

Modulation früher Komponenten der somatosensorisch evozierten Felder durch
selektive Aufmerksamkeit auf taktile Reize in einer One-back-Aufgabe

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Christiane Kliemann

**geboren am 30.11.1984
in Frankenberg**

Gutachter

- 1. Prof. Dr. med. O. W. Witte, FSU Jena**
- 2. Prof. Dr. med., phil. habil. T. Weiß, FSU Jena**
- 3. Prof. Dr. -Ing. habil. J. Haueisen, TU Ilmenau**

Tag der öffentlichen Verteidigung: 03. Februar 2009

Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen

ALM	Allgemeines Lineares Modell
ARAS	Aszendierendes retikuläres Aktivierungssystem
BEM	Boundary Element-Method
BOLD	Blood Oxygen Level Dependency
CMR	Common-Mode-Rejection
CSF	Cerebrospinalflüssigkeit
EEG	Elektroenzephalographie
EKG	Elektrokardiogramm
EKP	Ereigniskorrelierte Potentiale
EOG	Elektrookulographie
EPSP	Exzitatorisches postsynaptisches Potential
FBB-HKS	Fremdbeurteilungsbogen für hyperkinetische Störungen
GABA	Gamma-Aminobuttersäure
GLM	General Linear Model
IPSP	Inhibitorisches postsynaptisches Potential
IQ	Intelligenzquotient
LCCS	Limitiertes Kapazitätskontrollsystem
MEG	Magnetoenzephalographie
MGFP	Mean Global Field Power
MRF	Mesencephale retikuläre Formation
MRT	Magnetresonanztomographie
PET	Positronenemissionstomographie
PFC	Präfrontaler Kortex
RA	schnell adaptierend
SI	Primärer somatosensorischer Kortex
SII	Sekundärer somatosensorischer Kortex
SA	langsam adaptierend
SEP	Somatosensorisch evozierte Potentiale
SEF	Somatosensorisch evozierte Felder
SPECT	Single Photon Emission Computertomographie

SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
T1	Relaxationszeit bei der MRT-Messung; T1 gewichtete Bilder haben eine höhere Ortsauflösung und einen geringeren Gewebekontrast

Eigene Abkürzungen

A	Aufmerksamkeitsausrichtung auf die taktile Reizung des Zeigefingergrundes und der Zeigefingerspitze
B	Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Leuchtdioden während der taktilen Stimulation des Zeigefingergrundes und der Zeigefingerspitze
C	Aufmerksamkeitsausrichtung auf die taktilen Stimuli an der Zeigefingerspitze und der Kleinfingerspitze
Cz	Vertex: Schnittpunkt der Verbindungslinie zwischen Nasion und Inion und der Linie zwischen dem linken und rechten präaurikulären Punkt
q	Dipolstärke
t	Zeitpunkt
dev	Deviation, Abweichung in %
Gr.	Gruppe

Einheiten

μT	Mikrotesla
fT	Femtotesla
pT	Pikotesla
T	Tesla
°C	Grad Celsius
K	Kelvin
μV	Mikrovolt
Hz	Hertz
ms	Millisekunden

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	3
Inhaltsverzeichnis.....	5
Zusammenfassung.....	7
1 Einleitung.....	9
1.1 Somatoviszzerale Sensorik.....	11
1.1.1 Übersicht.....	11
1.1.2 Der Tastsinn.....	11
1.1.3 Entstehung der somatoviszzeralen Information auf Rezeptorebene.....	11
1.1.4 Neurophysiologische Grundlagen der Weiterleitung des Signals.....	14
1.1.5 Weiterleitung somatoviszzeraler sensorischer Informationen.....	15
1.1.6 Verarbeitung somatoviszzeraler sensorischer Informationen auf Thalamusebene.....	20
1.1.7 Somatosensorischer Kortex.....	21
1.1.8 Prinzipien zur Erhöhung der Auflösung.....	23
1.2 Die Aufmerksamkeit.....	25
1.2.1 Einteilung der Aufmerksamkeit.....	25
1.2.2 Aufmerksamkeitsmodelle.....	26
1.2.3 Verarbeitung der Aufmerksamkeit.....	30
1.2.4 Neuroanatomische Grundlagen des Aufmerksamkeitsprozesses	31
1.2.5 Störungen der Aufmerksamkeit.....	33
1.3 Methoden zur Messung der Hirnaktivität.....	35
1.4 MEG.....	37
1.4.1 Dipolentstehung.....	37
1.4.2 Mess- und Analysemethode.....	38
1.4.3 Das inverse Problem.....	39
1.4.4 Quellenmodelle.....	39
1.4.5 Volumenleitermodelle.....	40
1.4.6 Anwendung.....	40
1.4.7 Vergleich der EEG und der MEG.....	41
1.4.8 Ausblick.....	42
1.5 Ereigniskorrelierte Hirnpotentiale (EKP).....	42
1.5.1 Einfluss der Aufmerksamkeit auf die Ereigniskorrelierten Potentiale des somatosensorischen Kortex.....	43

2 Ziele, Fragestellungen und Hypothesen.....	46
3 Methodik.....	48
3.1 Stichprobe.....	48
3.2 Stimulation und Paradigma.....	48
3.3 Versuchsaufbau.....	49
3.4 Versuchsablauf.....	50
3.5 Datenauswertung.....	53
3.6 Messfehler.....	56
3.7 Statistische Analyse.....	56
4 Ergebnisse.....	60
4.1 Quellenlokalisierung.....	60
4.2 Objektive und subjektive Fehlerverteilung.....	62
4.3 Auswertung der Messergebnisse mit Überprüfung der Hypothesen.....	70
5 Diskussionen.....	78
6 Schlussfolgerungen.....	89
7 Literatur- und Quellenverzeichnis.....	90
8 Anhang.....	99
8.1 Einverständniserklärung.....	99
8.2 Dokument für Probandenangaben.....	100
8.3 Protokoll.....	101
8.3 Skalen zur Einschätzung des Schwierigkeitsgrades und der Richtigkeit.....	102
8.5 Datentabellen.....	103
8.6 Lebenslauf.....	106
8.7 Danksagung	
.....	
107	
8.8 Ehrenwörtliche Erklärung	
.....	
108	

Zusammenfassung

Bei Untersuchungen des somatosensorischen Kortex konnte in Vorläuferstudien am biomagnetischen Zentrum Jena (Karlowsky 1999, Thomann 2004) eine Verringerung der Reizantwort während selektiver Aufmerksamkeit gezeigt werden. Hingegen konnte in vielen anderen Studien eine Erhöhung der Signalstärke im somatosensorischen Kortex während selektiver Aufmerksamkeit nachgewiesen werden. Nachdem aus Karlowskys Arbeit (1999) ersichtlich wurde, dass unter Aufmerksamkeitszuwendung die Signalstärke im primären somatosensorischen Kortex abnimmt, nahm man an, dass dieser Effekt vermutlich durch eine laterale Inhibition hervorgerufen wird. Daher wurde in der Studie von Thomann (2004) versucht, den Prozess der lateralen Inhibition zu verifizieren. Es konnten zwar auch bei der Aufmerksamkeitsausrichtung auf die taktilen Reize im Vergleich zur Ablenkungsbedingung verminderte Signalintensitäten nachgewiesen werden, allerdings war kein signifikanter Unterschied zwischen der Reizung benachbarter und weiter entfernter Finger zu erkennen. Deshalb soll mit der vorliegenden Studie die Modulation des primären somatosensorischen Kortex durch Aufmerksamkeit und die Theorie der lateralen Inhibition weiter untersucht werden, indem man stärker benachbarte Fingerareale an einem Finger im Vergleich zu Stimulationsorten unterschiedlicher Finger reizt.

In der folgenden Arbeit wurde die Magnetoenzephalographie als Untersuchungsmethode gewählt. Mittels der Magnetoenzephalographie können magnetische Aktivitäten des Kortex gemessen werden, die durch elektrische Ströme aktiver Neurone verursacht werden. Dabei werden Magnetfelder, welche zur Rekonstruktion eines Dipols dienen, durch SQUID-Sensoren gemessen. In der vorliegenden Studie wurden drei verschiedene Messbedingungen untersucht. In einer Aufgabe erfolgte die Aufmerksamkeitszuwendung auf taktil stimulierte und benachbarte Areale am Zeigefinger, in der zweiten Aufgabe sollte eine Aufmerksamkeitsablenkung von taktilen Reizen am Zeigefinger mit gleichzeitiger Aufmerksamkeitszuwendung auf visuelle Reize stattfinden und eine weitere Aufgabe erforderte eine Aufmerksamkeitszuwendung auf taktil gereizte Areale am Zeige- und Kleinfinger.

Bei dem Vergleich der Dipol- und Feldstärken der unterschiedlichen Aufgaben konnten folgende Resultate gefunden werden: Bei Aufmerksamkeitszuwendung auf taktil gereizte Zeige- und Kleinfingerareale wurden größere Signalstärken als bei der Aufmerksamkeitsablenkung auf visuelle Reize unter Stimulation des Zeigefingers abgeleitet. Außerdem konnten bei der Aufmerksamkeitsausrichtung auf weiter entfernt liegende Fingerareale größere Signale als bei Aufmerksamkeitslenkung auf benachbarte Fingerareale detektiert werden.

Durch diese Ergebnisse konnte eine Modulation primär somatosensorischer Areale des Kortex durch Aufmerksamkeit nachgewiesen werden. Da bei Aufmerksamkeitsausrichtung auf benachbarte Fingerregionen geringere Signalstärken als bei Aufmerksamkeitszuwendung auf weiter entfernt liegende Fingerareale registriert wurden, lässt sich die Hypothese der lateralen Inhibition im primären somatosensorischen Kortex befürworten. Man vermutet, dass bei Aufmerksamkeitsausrichtung auf benachbarte Fingerareale eine stärkere Diskriminierung und daher eine starke Inhibition zur Differenzierung der eingehenden Reize notwendig ist.

Vergleicht man die vorliegende Studie mit den Vorgängerstudien, so fällt auf, dass die Signalintensitäten bei der Ablenkungsaufgabe tendenziell kleiner als bei der Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf die taktilen Reize sind. Es muss aber beachtet werden, dass sich signifikante Ergebnisse nur bei dem Vergleich der Aufmerksamkeitszuwendung bei Stimulation von Zeige- und Kleinfinger und der Aufmerksamkeitsablenkung unter Stimulation der Zeigefingerareale ergaben. Eine geringere Signalintensität unter Aufmerksamkeitsablenkung wurde in den meisten Studien publiziert, steht aber im Widerspruch zu den Vorläuferstudien von Karlowsky (1999) und Thomann (2004). Eine Ursache für diesen Unterschied könnte in der Ablenkungsbedingung selbst liegen: Karlowsky (1999) und Thomann (2004) reizten bei der Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Leuchtdioden Areale verschiedener Finger, während in der vorliegenden Versuchsreihe nur der Zeigefinger proximal und distal stimuliert wird. Hierbei ist es möglich, dass sich bei der Stimulation benachbarter Fingerareale die rezeptiven Felder überlappen und dieselben Nervenzellpopulationen aktivieren. Diese Zellpopulationen könnten bei einem kurzen Interstimulusintervall noch refraktär sein, so dass ein kleineres Signal als bei der Reizung weiter entfernt liegender Fingerareale ableitbar wäre. Außerdem könnte die Rezeptorendichte der Fingerareale oder die nervale Versorgung der Areale einen Einfluss auf die Signalaktivität im Kortex nehmen. Des Weiteren könnten Prozesse des Arbeitsgedächtnisses die Messergebnisse beeinflussen, da bei allen Messbedingungen eine One-back-Aufgabe verwendet wurde. Denkbar ist ebenfalls eine Interaktion zwischen visuellen Reizen und der taktilen Verarbeitung.

Ob diese unterschiedlichen Ablenkungsaufgaben einen Einfluss auf die Messergebnisse haben, müsste in einer weiteren Studie überprüft werden, in welcher mindestens zwei verschiedene Ablenkungsaufgaben untersucht werden. Sinnvoll wäre auch die Durchführung einer ähnlichen Studie mit einem MEG-Helmsystem und einer größeren Probandenzahl.

1 Einleitung

Der Begriff Aufmerksamkeit lässt sich nur schwer mit Worten erklären. William James erklärte am Ende des 19. Jahrhunderts: Jeder weiß, was Aufmerksamkeit ist. Sie ist das Besitzergreifen durch den Verstand, in einer klaren und lebhaften Form. Eines wird aus dem herausgegriffen, was wie mehrere gleichzeitig mögliche Objekte oder Gedankengänge scheint. Bündelung, Konzentration des Bewusstseins sind das Wesentliche. Sie beinhaltet das Zurückziehen von einigen Dingen, um mit den anderen wirkungsvoll umgehen zu können (Anderson 2001).

James (1890) geht also davon aus, dass Aufmerksamkeit an das Bewusstsein gebunden ist und ein einheitliches System darstellt. Allerdings hat sich die Meinung zum Thema Aufmerksamkeit im Laufe der Zeit gewandelt. Viele Aufmerksamkeitsphänomene laufen unbewusst ab und Aufmerksamkeit lässt sich vielmehr als ein Prozess verstehen. Es gibt viele Theorien und Modelle, welche die Aufmerksamkeitsverarbeitung unter verschiedenen Gesichtspunkten darstellen. In jüngster Zeit wurde der Einfluss der Aufmerksamkeit auf visuelle, akustische oder somatosensorische evozierte Potentiale untersucht. Außerdem wird mit diesen Experimenten versucht, Schlussfolgerungen über die Modulation der Aufmerksamkeit zu ziehen. Leicht vorstellbar ist, dass unser Aufmerksamkeitsstatus unsere Sinneswahrnehmung beeinflusst. Richten wir unsere Aufmerksamkeit auf taktile Reize, so nehmen wir diese Reize schneller und stärker wahr. Unklar scheint jedoch zu sein, inwiefern die Aufmerksamkeit die Informationsweiterleitung taktiler Reize sowie die Informationsverarbeitung im Kortex beeinflusst. Um Aussagen über die somatosensorische Informationsverarbeitung zu erhalten, wird unter anderem die Magnetoenzephalographie eingesetzt. Kortikale Neuronenaktivitäten erzeugen elektrische Ströme, die ein Magnetfeld hervorrufen, welches mit Hilfe der Magnetoenzephalographie nicht-invasiv gemessen werden kann. Um feststellen zu können, ob die Aufmerksamkeit einen Einfluss auf somatosensorisch evozierte Felder hat, werden in der vorliegenden Studie Probanden verschiedene Aufgaben unter taktiler Reizung gestellt, welche sowohl eine Aufmerksamkeitszuwendung als auch eine Ablenkung erfordern. Dass der Aufmerksamkeitsgrad die Dipolstärke im sekundären somatosensorischen Kortex beeinflusst, wird nicht bezweifelt (Backes et al. 2000, Desmedt und Robertson 1977, Eimer und Forster 2003, Fujiwara et al. 2002, Hämäläinen et al. 2000, Hamada et al. 2003, Hoechstetter et al. 2000, Hötting et al. 2003, Hsiao et al. 1993, Johansen-Berg et al. 2000, Mima et al. 1998, Nelson et al. 2004, Sterr et al. 2007).

Inwiefern Aufmerksamkeit den primären somatosensorischen Kortex beeinflusst ist unklar. Während in Studien von Backes et al. (2000), Fujiwara et al. (2002), Hamada et al. (2003), Hoechstetter et al. (2000) und Mima et al. (1998) kein Einfluss der Aufmerksamkeit auf evozierte Potentiale im primären somatosensorischen Kortex festgestellt werden konnte, zeigten Studien von Eimer und Forster (2003), Garcia-Larrea et al. (1991), Hötting et al. (2003), Hsiao et al. (1993), Hyvärinen et al. (1980), Iguchi et al. (2002), Johansen-Berg et al. (2000), Lam et al. (2001), Meyer et al. (1991), Nelson et al. (2004) und Sterr et al. (2007) eine erhöhte Aktivität in SI unter Aufmerksamkeitszuwendung auf somatosensorische Reize. Hingegen zeigten die Vorläuferstudien von Karlowsky (1999), Thomann (2004) und eine Studie von Mauguière et al. (1997b) eine Abnahme der Signalstärke in SI unter Aufmerksamkeitszuwendung. Karlowsky (1999) vermutete, dass eine Verminderung der Dipol- und Feldstärke im primären somatosensorischen Kortex während der Aufmerksamkeitszuwendung durch den Prozess der lateralen Inhibition hervorgerufen sein könnte. Diese Theorie sollte in den Nachfolgeexperimenten von Bartenbach (2004) und Thomann (2004) untersucht werden. Während Bartenbach (2004) keinen Einfluss der Aufmerksamkeit auf die frühen Komponenten der Signale des primären somatosensorischen Kortex zeigen konnte, fand Thomann (2004) bei Aufmerksamkeitszuwendung auf taktile Reize ebenfalls eine Signalintensitätsabnahme. Allerdings konnte kein signifikanter Signalunterschied zwischen der Reizung benachbarter und weiter entfernt liegender Finger belegt werden. In der Studie von Mauguière et al. (1997b) konnte nur eine tendenzielle und keine signifikante Abnahme der Signalstärke in SI unter Aufmerksamkeitszuwendung nachgewiesen werden.

Die unterschiedlichen Studienergebnisse verdeutlichen, dass weitere Untersuchungen notwendig sind, um erkennen zu können, inwiefern Aufmerksamkeitsprozesse einen Einfluss auf den primären somatosensorischen Kortex haben. Dabei können die Signale im somatosensorischen Kortex durch verschiedene Faktoren wie die Art der taktilen Reizung, das Stimulationsparadigma und die Messmethode beeinflusst werden. Neben dem Interstimulusintervall, der Stimulusrate und der Stimulusintensität scheinen weitere Kriterien des Stimulationsparadigmas eine Rolle bei der Signalverarbeitung im somatosensorischen Kortex zu spielen. Beispielsweise kann eine One-back-Aufgabe andere Messergebnisse im somatosensorischen Kortex hervorrufen, als Aufgaben, die keine Gedächtnisprozesse erfordern. Auch können intramodale im Vergleich zu intermodalen Stimulationsparadigma zu unterschiedlichen Signalstärken führen. Es ist möglich, dass diese verschiedenen Einflussfaktoren auch untereinander interagieren.

1.1 Somatoviszzerale Sensorik

1.1.1 Übersicht

Das sensorische System des Menschen dient der Aufnahme von Informationen aus der Umwelt sowie des eigenen Körpers. Man unterscheidet die Exterozeption, die sich in den Tast- und Temperatursinn untergliedert, die Nozizeption zur Schmerzempfindung, die Propiozeption zur Wahrnehmung der Tiefensensibilität (Stellungs-, Bewegungs- und Kraftsinn) und die Entero- bzw. Viszerozeption, um Signale von inneren Organen wahrzunehmen. Man kann die Sensibilität auch in eine epikritische und protopathische Sensibilität unterteilen. Tast-, Bewegungs-, Kraft- und Stellungssinn zählen zur epikritischen Sensibilität. Hingegen zählen zur protopathischen Sensibilität Temperatursinn, Nozizeption und auch die Viszerozeption. Die epikritische Sensibilität wird über den Lemniscus medialis im Hinterstrang des Rückenmarks weitergeleitet. Über den Vorderseitenstrang verläuft die protopathische Sensibilität (Huppelsberg und Walter 2003).

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich vor allem mit dem Tastsinn, auch Mechanorezeption genannt, so dass auf diesen im Folgenden näher eingegangen werden soll.

1.1.2 Der Tastsinn

Der Tastsinn dient zur Wahrnehmung der Gestalt von Gegenständen und ist für die Entstehung einer Raumvorstellung von Bedeutung. Unter Stereognosie versteht man das Erkennen von Gegenständen nur mit Hilfe des Tastsinns. Um die Umwelt durch Tasten wahrnehmen zu können, sind Mechanosensoren notwendig. Durch eine höhere Sensorendichte an den Fingerspitzen und der Palmarseite der Hand ist in diesen Regionen eine bessere Auflösung bei der Berührung von Gegenständen möglich. Folglich sind beispielsweise zwei Punkte, an denen der Rücken in einem Abstand von ca. 10 cm berührt wird, schwieriger als zwei voneinander getrennte Punkte wahrzunehmen, als wenn zwei Punkte in der Entfernung von 10 cm an der Palmarseite der Hand berührt werden.

1.1.3 Entstehung der somatoviszeralen Information auf Rezeptorebene

Die Sensoren dienen der Aufnahme von Reizen, wobei eine optimale Erregung des Sensors nur durch einen adäquaten Reiz erfolgt. Man unterscheidet Mechano-, Photo-, Thermo-,

Osmo-, Chemo- und Schmerzsensoren. Nozizeptoren sprechen meist auf mehrere Reizformen an, so dass sie als polymodale Rezeptoren bezeichnet werden. Sie zählen außerdem zu den hochschwelligen Rezeptoren, da sie unempfindlicher sind als die niederschwelligen Mechanosensoren. Diese höhere Empfindlichkeit der Mechanosensoren beruht auf einer überwiegend schnellen Weiterleitung der Aktivität mit einer Geschwindigkeit von 30-90m/s durch dicke markhaltige Axone.

Zur Wahrnehmung von Berührung, Druck und Vibration sind verschiedene Mechanosensoren notwendig (vgl. Abb. 1). Dabei unterscheidet man bei den Drucksensoren die Merkel-Zellen der unbehaarten Areale von den Merkel-Tastscheiben der behaarten Haut. Sie registrieren neben der Intensität des Druckes auch die Geschwindigkeit der Druckänderung und zählen daher zu den Proportional- und Differentialsensoren. Außerdem können sie wegen ihrer langsamen Adaptation als SA-I-Rezeptoren bezeichnet werden, denn sie erzeugen trotz lang andauernder mechanischer Stimulation stets Aktionspotentiale in den afferenten Fasern. Damit zunehmender Stärke der Hautdeformation ihre Entladungsfrequenz steigt, werden sie auch Intensitätssensoren genannt. Man findet sie histologisch zwischen Korium und Epidermis der Haut (Huppelsberg und Walter 2003, Zimmermann 2005).

Ruffini-Körperchen dienen der Wahrnehmung von Gewebedehnung. Sie zählen zu den SA-II-Rezeptoren und liegen in tiefen Koriumschichten oder submukösen Bindegewebe. Bei einem konstanten Hautreiz werden nur die SA-Rezeptoren aktiviert, welche die Intensität und die Dauer des Reizes registrieren.

Zur Wahrnehmung bewegter Reize dienen Meissner-Körperchen der unbehaarten Haut und Haarfollikelsensoren der behaarten Areale. Sie registrieren die Geschwindigkeit der Reizänderung und zählen daher zu den Differentialfühlern. Da sie sich an einen Reiz rasch adaptieren, werden sie auch als RA-Sensoren bezeichnet. Sie feuern nur kurz bei Beginn und Beendigung eines Reizes.

Die Pacini-Körperchen, die sich im subkutanen Bindegewebe befinden, nehmen als Beschleunigungssensoren Vibration wahr und besitzen die niedrigste Reizschwelle von allen Mechanosensoren. Sie adaptieren sehr schnell. Meistens feuern sie nur bei einer Änderung der Geschwindigkeit der Hautdeformation (Birbaumer und Schmidt 2006, Huppelsberg und Walter 2003).

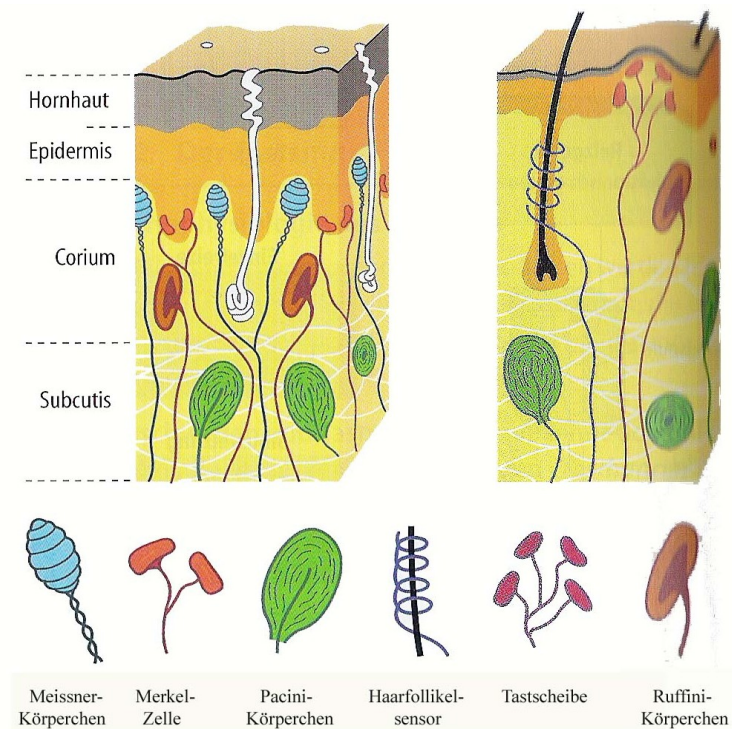


Abb. 1: Darstellung der unterschiedlichen Rezeptortypen in der unbehaarten Haut (linke Abbildung) und behaarten Haut (rechte Abbildung) (Zimmermann 2005, Seite 300).

In den Fingerspitzen und der Handinnenfläche ist eine hohe Dichte der Mechanosensoren feststellbar. Weiterhin ist zu beachten, dass die Dichte der Hautrezeptoren in den Fingerspitzen höher ist als in den proximalen Fingerregionen bzw. den Handinnenflächen (vgl. Abb. 2).

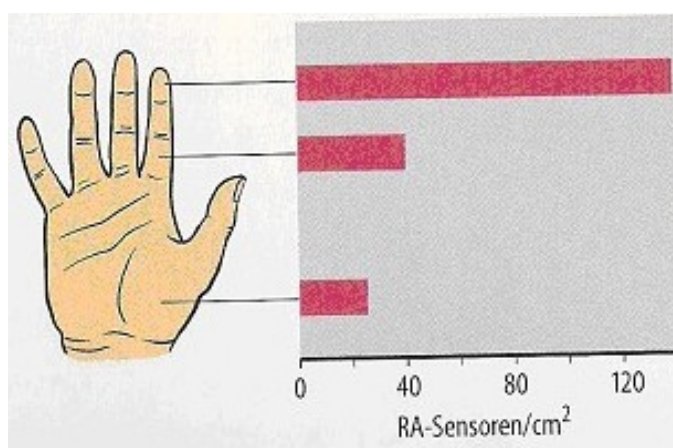


Abb. 2: In der Abbildung wird die RA-Sensorendichte/cm² der Palmarseite der Hand gezeigt, wobei die distalen Areale eine höhere Rezeptorendichte als die proximalen Areale besitzen (Handwerker 2005, Seite 293).

1.1.4 Neurophysiologische Grundlagen der Weiterleitung des Signals

Ruhemembranpotential

An allen lebenden Zellen findet man in Ruhe ein elektrisches Potential, welches von der Ionenverteilung und der Membranpermeabilität abhängig ist. Dieses Potential wird als Ruhemembranpotential bezeichnet. Typischerweise befinden sich in einer Nervenzelle viele Protein-Anionen und Kalium-Kationen, während sich Chlorid-Anionen und Natrium-Kationen extrazellulär befinden. Da die Membran in Ruhe eine relativ hohe Leitfähigkeit für Kalium-Ionen aufweist, können Kalium-Ionen vom Zellinneren nach außen strömen. Alle anderen Ionen können nur gering oder gar nicht die Zellmembran passieren, so dass das Ruhemembranpotential mit -60 bis -80mV nahe am Kalium-Gleichgewichtspotential liegt (Huppelsberg und Walter 2003).

Aktionspotential

Ein Sensor wird mittels eines adäquaten Reizes stimuliert, wenn dieser Reiz größer als die Erregungsschwelle ist. Dabei wird die Zellmembran depolarisiert, Membrankanäle geöffnet und es entstehen Ionenströme. Es wird ein Generatorpotential, auch Sensorpotential oder Rezeptorpotential genannt, ausgelöst.

Mit zunehmender Stärke des Reizes steigt die Amplitude des Generatorpotentials. Diese Amplitudenkodierung wird als Transduktion bezeichnet. Unterschiedlich starke Reize führen meistens auch zu einer unterschiedlich starken Depolarisation. Wenn die Reizstärke größer als der Arbeitsbereich des Sensors ist, kann das Generatorpotential nicht weiter ansteigen. Das Potential breitet sich elektrotonisch über die Nervenzelle aus. Als zweiter Schritt erfolgt die Umwandlung des Sensorpotentials in eine Aktionspotentialsequenz. Dieser Vorgang wird auch als Transformation bezeichnet und erfolgt in der Regel am ersten Schnürring der afferenten Faser.

Bei primären Sinneszellen erfolgt eine direkte Transformation eines Rezeptorpotentials in ein Aktionspotential. Primäre Sinneszellen sind Endigungen freier Nervenfasern wie beispielsweise Geruchssensoren oder Spinalganglienzellen als Sensoren für somatoviszzerale Sensibilität. Im Unterschied dazu können sekundäre Sinneszellen, wie beispielsweise Haarzellen des Innenohres, nicht selbst ein Aktionspotential generieren, sondern ein Generatorpotential wird mittels einer Transmitterausschüttung übersetzt, wodurch erst an der folgenden Nervenzelle mit Hilfe eines exzitatorischen postsynaptischen Potentials ein Aktionspotential ausgelöst wird.

Durch Depolarisation der Nervenzellmembran und Erreichen eines kritischen Schwellenwertes öffnen sich schnelle, spannungsabhängige Natriumkanäle, die einen Natriumeinstrom ermöglichen, so dass ein Aktionspotential nach dem Alles- oder Nichts-Gesetz entsteht. Je größer die Amplitude des Generatorpotentials und je stärker der Ausgangsreiz ist, desto hochfrequenter ist das Aktionspotential. Je nach Sensortyp ist eine tonische Antwort möglich, die proportional zur Reizintensität ist, oder eine phasische Antwort, welche die Änderung der Reizgeschwindigkeit widerspiegelt (Dudel 2000a).

Exzitatorisches postsynaptisches Potential

Zur Weiterleitung einer Erregung von einer zur anderen Nervenzelle sind exzitatorische postsynaptische Potentiale (EPSP) notwendig. Ein typischer exzitatorischer Transmitter ist Glutamat, der EPSP durch Erhöhung der Natrium-Permeabilität an der subsynaptischen Membran auslöst. Um ein Aktionspotential an der folgenden Nervenzelle auszulösen, sind mehrere EPSP notwendig. Daher treffen entweder viele EPSP nacheinander an der subsynaptischen Membran der Zielzelle ein oder die Zielsynapse erhält EPSP von mehreren Synapsen. Diese Vorgänge werden als zeitliche bzw. räumliche Summation bezeichnet und dienen der Fortleitung eines Aktionspotentials zwischen Neuronen (Dudel 2000b).

Inhibitorisches postsynaptisches Potential

Die Hemmung einer Zielzelle erfolgt durch inhibitorische postsynaptische Potentiale (IPSP). Dabei verursachen Transmitter wie GABA (Gamma-Aminobuttersäure) oder Glycin eine Erhöhung der Kalium- oder Chloridpermeabilität der Rezeptoren. Durch den Chlorideinstrom bzw. den Kaliumausstrom wird die Zielzelle hyperpolarisiert (Dudel 2000b).

1.1.5 Weiterleitung somatoviszeraler sensorischer Informationen

Somatoviszerale sensorische Sinneszellen zählen zu pseudounipolaren Nervenzellen. Ihr Zellsoma befindet sich in den Spinalganglien, wobei die Zellfortsätze sowohl zu den entsprechenden Sensoren in der Peripherie als auch bis in das Rückenmark reichen. Weil eine direkte Umwandlung eines Rezeptorpotentials in ein Aktionspotential an den somatoviszeralen sensorischen Sinneszellen möglich ist, werden sie auch als primäre Sinneszellen bezeichnet. Die Innervationsgebiete der peripheren Hautnerven sind relativ scharf begrenzt und zeigen eine geringe Überlappung. Diese peripheren Nerven werden im Spinalganglion umbündelt und treten über die Hinterwurzel in das Rückenmark ein. Das

Innervationsgebiet einer Hinterwurzel, welches aus Anteilen verschiedener peripherer Nerven entsteht, wird als Dermatome bezeichnet und zeigt oft eine starke Überlappung mit Innervationsgebieten anderer Hinterwurzeln (vgl. Abb.3 und 4).

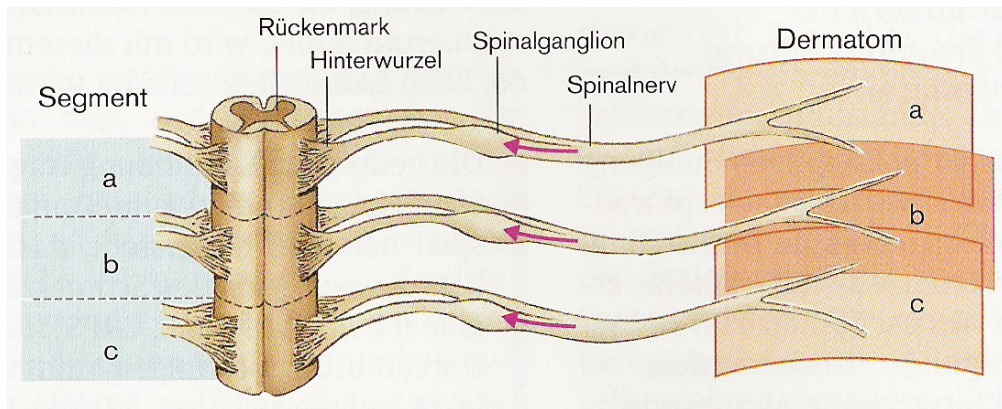


Abb. 3: Jede Hinterwurzel innerviert mit den dazugehörigen Nervenfasern ein bestimmtes Hautareal (Dermatom) (Meßlinger 2005, Seite 642).

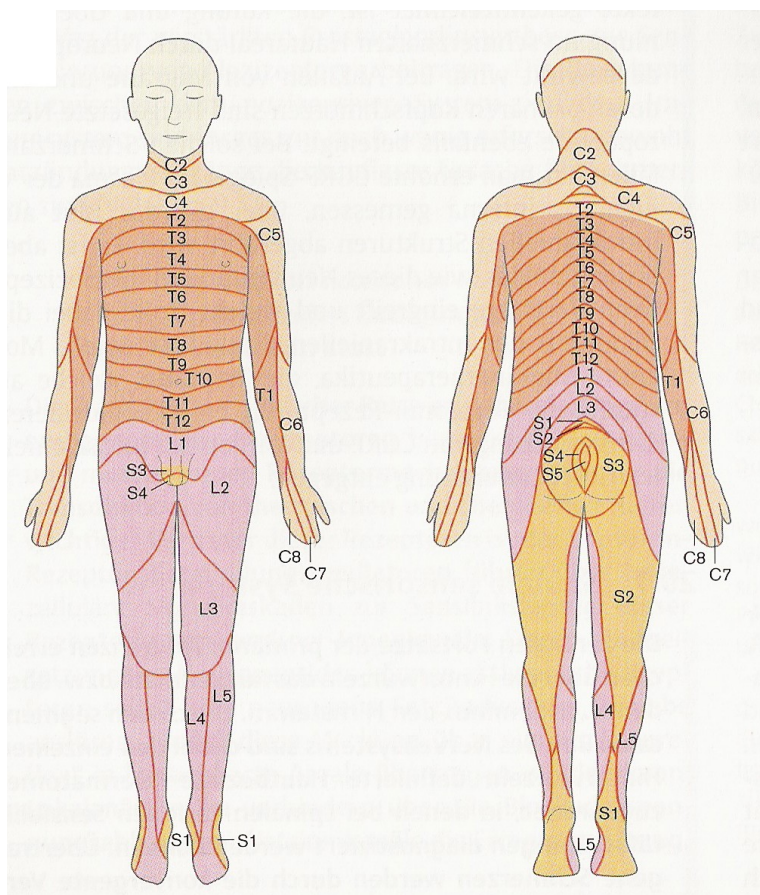


Abb. 4: Die Dermatome können den cervikalen (C), thorakalen (T), lumbalen (L) und sakralen (S) Hinterwurzeln segmental zugeordnet werden (Meßlinger 2005, Seite 642).

Im Hinterhorn können eingehende Aktivitäten der somatoviszeralen sensorischen Afferenzen durch hemmende Interneurone oder absteigende Bahnen des Gehirns gehemmt werden.

Treffen mehrere primäre Afferenzen auf ein sekundäres Neuron, wird dieser Vorgang als Konvergenz bezeichnet. Hingegen versteht man unter Divergenz eine Verzweigung der primären Afferenzen an verschiedenen sekundären Neuronen. Konvergieren im Hinterhorn Afferenzen von Haut und Viszera, so ist es möglich, dass Organschmerzen von Patienten fälschlicherweise als Hautschmerzen lokalisiert werden. Dabei sind den Organen bestimmte Hautareale zugeordnet, die als Head Zonen bezeichnet werden.

Alle somatoviszeralen sensorischen Informationen gelangen über das Hinterhorn in die graue Substanz des Rückenmarks. Dabei enden Verzweigungen dicker markhaltiger Neurone ($A\alpha\beta$ -Fasern) eher in den ventrolateralen Abschnitt, während dünne markhaltige oder marklose Axone ($A\delta$ - oder C-Fasern) in dem dorsomedialen Bereich des Rückenmarks liegen. Endverzweigungen der Axone können Verbindungen zu Interneuronen, α -Motoneuronen und Projektionsneuronen aufweisen. Interneurone können die einzelnen Rückenmarkssegmente oder die Neurone innerhalb eines Segmentes miteinander verbinden. Signale werden durch α -Motoneurone direkt an die Muskelspindelafferenzen weitergeleitet. Projektionsneurone vermitteln Informationen zum kortikalen Bereich. Das Rückenmark kann in Schichten (Laminae nach Rexed) untergliedert werden. Dicke markhaltige Neurone haben in fast allen Schichten Endigungen. Hingegen weisen dünne markhaltige bzw. marklose Nervenfasern nur in den Laminae I, II und V Endigungen auf. Diese drei Schichten erhalten Signale von selektiven sowie von multirezeptiven Neuronen. Selektive Neurone bekommen Informationen von nur einem Rezeptortyp (z.B. Thermorezeptor), während multirezeptive Neurone Signale von mehreren verschiedenen Rezeptoren (z.B. Nozizeptoren und Mechanosensoren) empfangen können. Spinale viszerale Afferenzen enden in Laminae I und V. In Laminae III und IV enden vor allem niederschwellige Mechanorezeptoren. Hingegen ziehen niederschwellige Muskel- und Gelenkafferenzen in die Lamina VI. In den Hinterhörnern findet eine Verarbeitung der eingehenden Signale auf spinaler Ebene statt. Diese kann zu einer Aktivierung oder Hemmung von bereits erwähnten Interneuronen, α -Motoneuronen und Projektionsneuronen führen, was die Grundlage für spinale Reflexe oder eine unbewusste Kontrolle der Somatomotorik durch Bahnen zum Kleinhirn darstellt.

Die Weiterleitung der somatoviszeralen sensorischen Impulse erfolgt über das Hinterstrang- und Vorderseitenstrangsystem (vgl. Abb. 5). Während die Oberflächen- und Tiefensensibilität über das Hinterstrangssystem weitergeleitet wird, erfolgt eine Umschaltung des Temperaturempfindens, des Schmerzes und vermutlich auch der Viszerozeption auf das Vorderseitenstrangsystem.

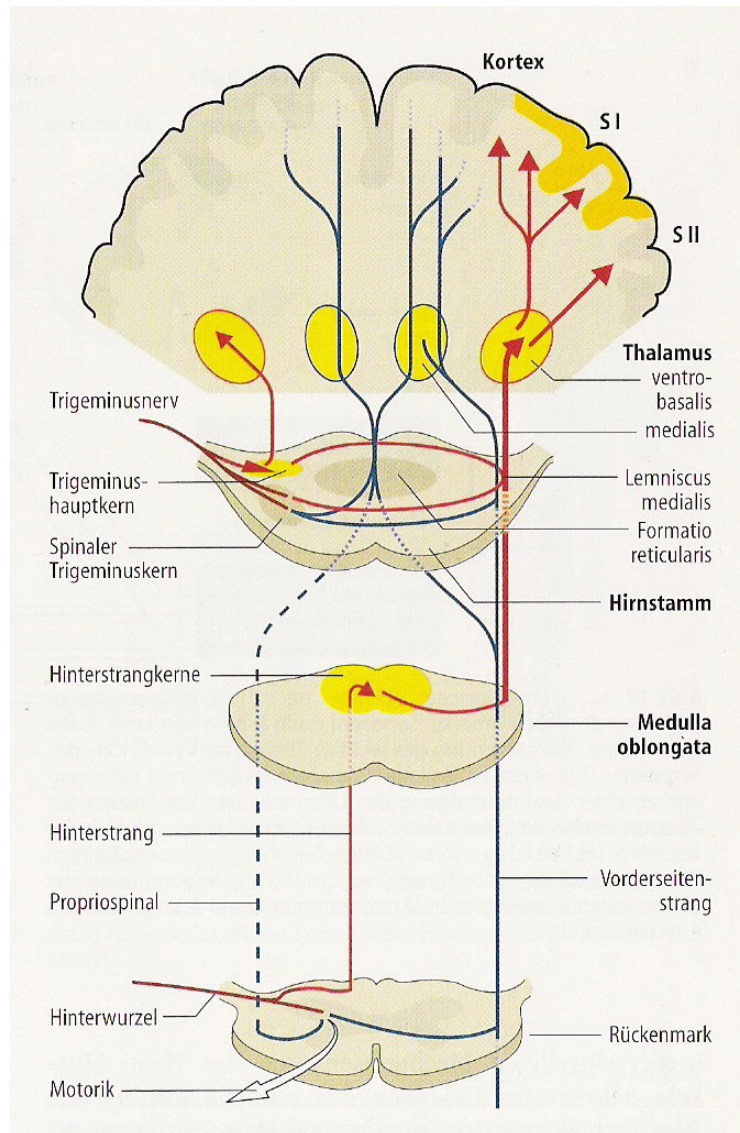


Abb. 5: Vereinfacht ist die Weiterleitung somatoviszeraler sensorischer Informationen von der Hinterwurzel, über das Rückenmark, den Thalamus, bis in den Kortex dargestellt (Zimmermann 2005, Seite 297).

Der Tast-, Bewegungs-, Kraft- und Stellungssinn wird ipsilateral im Hinterstrang (Funiculus posterior) als Tractus spinobulbaris weitergeleitet. Segmente unter T7 bilden den weiter medial gelegenen Funiculus gracilis, während alle darüber liegenden Axone den lateralen Funiculus cuneatus bilden. Daher sind die Axone im Rückenmark segmental geschichtet. In der Medulla oblongata erfolgt eine Umschaltung der Fasern der epikritischen Sensibilität auf ein zweites Neuron innerhalb der Nuclei cuneatus et gracilis. Anschließend kreuzen die Neurone als Tractus lemniscus medialis und gelangen kontralateral zu den posterioren und ventrobasalen Thalamuskernen, wo eine Umschaltung auf das dritte Neuron erfolgt. Letztendlich gelangen die Signale in den Gyrus postcentralis (Brodmann-Area: 1, 2 und 3), wobei nach dem Prinzip des Homunkulus (vgl. Abb. 6) Fasern von kranial im Gyrus

somatotop weiter lateral und Fasern von kaudal weiter medial angeordnet werden. Das Hinterstrangsystem ist durch eine sichere synaptische Übertragung, eine Leitung spezifischer Informationen, eine schnelle Übertragung der Signale und eine genaue Somatotopie gekennzeichnet. Es ermöglicht taktile Diskriminationsvorgänge und die Durchführung komplexer sensomotorischer Aufgaben.

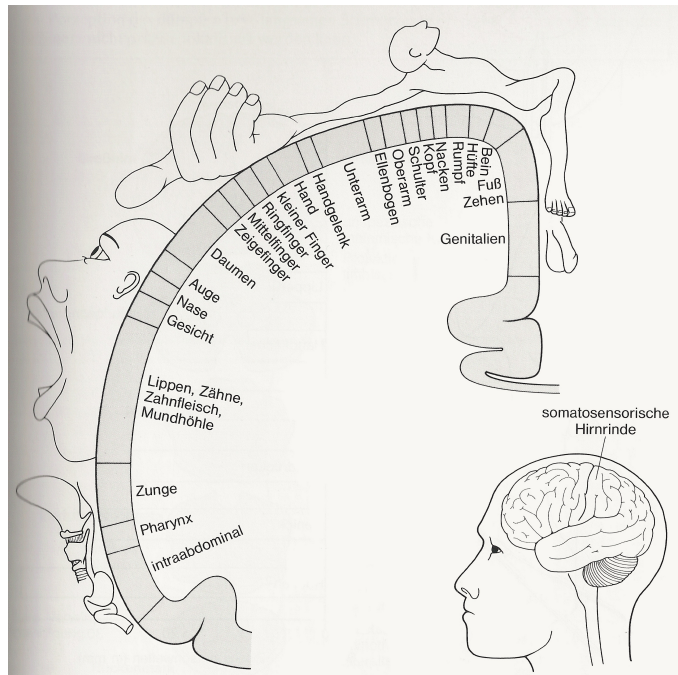


Abb. 6: Dargestellt ist der Homunkulus des somatosensorischen Kortex (Bartsch 1993, Seite 135).

Eine Sonderstellung nimmt die Sensibilität des Trigeminus-Bereiches ein, da die Neurone im sensiblen Trigeminuskern auf das zweite Neuron (Tractus trigeminothalamicus) umgeschaltet werden und eine Informationsverarbeitung vorwiegend im ventroposteromedialen Thalamuskomplex stattfindet.

Die protopathische Sensibilität, die Temperatur- und Schmerzempfinden beinhaltet, wird im Hinterhorn des Rückenmarks auf das zweite Neuron umgeschaltet. Die Nervenfasern kreuzen auf Segmentebene und verlaufen kontralateral als Vorderseitenstrang im Tractus spinothalamicus lateralis, Tractus spinoreticularis und Tractus spinotectalis. Dabei liegen die Axone höherer Segmente weiter medial und ventral. Die Neurone des Tractus spinoreticularis beeinflussen in der Formatio reticularis das aufsteigende retikuläre Aktivierungssystem (ARAS). Von dem ARAS können Fasern die intralaminären, unspezifischen Thalamuskern, die zum Truncothalamus zählen, erreichen. Dadurch erfolgt eine unspezifische diffuse Kortexerregung, die zu einer Wach- oder Weckreaktion führt. Der Tractus spinothalamicus lateralis enthält Fasern, die zum posterioren, intralaminären oder zum ventrobasalen Thalamuskern (Palliothalamus) ziehen. Vom posterioren Thalamuskern gelangen die Signale

zum limbischen System und diffus zu allen Großhirnrindenbereichen. Diese Fasergruppe wird dem paläospinothalamischen System zugeordnet. Die Fasergruppe des neospinothalamischen Systems wird im ventrobasalen Thalamuskomplex umgeschaltet und erreicht von da den Gyrus postcentralis. Durch das Vorderseitenstrangsystem werden Affekt, Aufmerksamkeit und Vigilanz beeinflusst (Trepel 1999, Zimmermann 2005).

1.1.6 Verarbeitung somatoviszeraler sensorischer Informationen auf Thalamusebene

Der Thalamus dient zur Selektion von Impulsen und wirkt dadurch einer Reizüberflutung der Großhirnrinde entgegen. Die somatoviszeralen Informationen werden überwiegend im Ventrobasalkern des Thalamus umgeschaltet. Man kann diesen Kern in einen Nucleus ventralis posterolateralis, der überwiegend Afferenzen des Körpers durch den Tractus lemniscus medialis erhält, und einen Nucleus ventralis posteromedialis, der Aktivitäten vom Gesichtsbereich durch den Tractus trigeminothalamicus zugeleitet bekommt, unterteilen.

Die Neurone des Ventrobasalkerns unterliegen einer somatotopen Ordnung, so dass Neurone der Hände und Füße ventral, des Rumpfes dorsal, des Kopfes medial und der unteren Körperregion lateral liegen. Je größer die Rezeptorendichte in einer bestimmten Körperregion ist, desto größer ist das entsprechende Kernvolumen. Da ein Thalamusneuron Signale von mehreren Rezeptoren der Peripherie erhält, sind die rezeptiven Felder größer als die der vorgeschalteten Neurone. Zellen des Thalamuskernkomplexes, welche Informationen von einer Körperregion und einem Rezeptortyp erhalten, liegen als Module räumlich zusammen. Die Signale werden in den primären und sekundären somatosensorischen Kortex projiziert. Der ventrobasale Kernkomplex dient vor allem dem Erkennen des Reizortes, der Reizart und der Reizstärke.

Der posteriore Thalamuskern weist keine somatotopische Ordnung auf. Er erhält vorwiegend multirezeptive Signale beider Körperseiten vom Tractus lemniscus medialis und Tractus spinothalamicus lateralis. Die Projektion der Information erfolgt in den parietalen Assoziationskortex und den sekundären somatosensorischen Kortex.

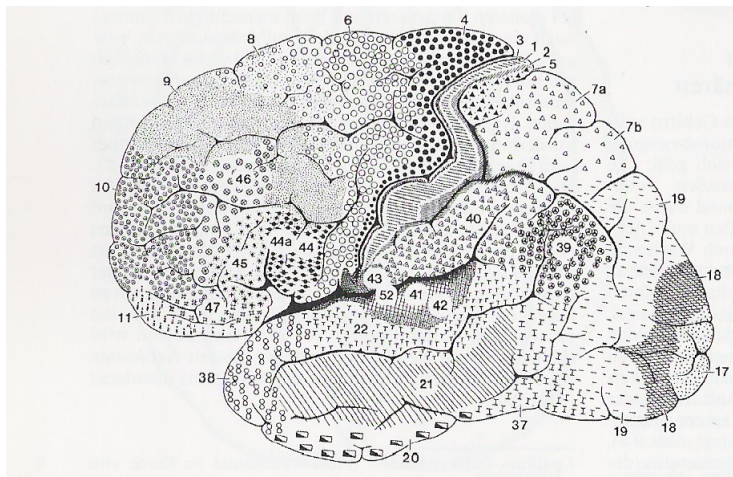
Der Tractus spinothalamicus endet gemeinsam mit dem Tractus reticulothalamicus in den intralaminären und medialen Thalamuskernen. Die Projektion der Zellen erfolgt in kortikale und subkortikale Bereiche, wobei Verbindungen zum Gyrus cinguli und zur Insula für das Schmerzerleben bedeutend sind. Außerdem sind diese Verbindungen für den Affekt, den Antrieb und die Vigilanz wichtig (Trepel 1999, Zimmermann 2005).

1.1.7 Somatosensorischer Kortex

Im somatosensiblen Kortex wird ein sensibler Reiz lokalisiert sowie seine Art und Intensität wahrgenommen und interpretiert. Man unterteilt den somatosensorischen Teil des Kortex in eine primäre und sekundäre Rinde.

Die Funktion des primären somatosensorischen Kortex SI besteht in der Wahrnehmung der Reize. SI befindet sich unmittelbar kaudal des Sulcus centralis, reicht bis zum Sulcus lateralis und zählt zum Gyrus postcentralis. Nach Brodmann wird der Gyrus in die Areae 1, 2, 3a und 3b untergliedert (vgl. Abb.7). Afferenzen bestimmter Rezeptorenarten enden in einigen Areae häufiger als in anderen Areae. So enden in der Area 1 vorrangig Afferenzen der Hautrezeptoren (Berührung), in der Area 2 Afferenzen von Gelenken (Lagesinn), in der Area 3a Muskelspindelafferenzen und in der Area 3b Afferenzen weiterer Rezeptoren der Haut (Schmerz, Temperatur).

Abb. 7: Die Rindenfeldgliederung nach Brodmann ist dargestellt (Braak und Braak 2004, Seite 494).



Außerdem ist der Gyrus postcentralis somatotopisch gegliedert, so dass Regionen mit hoher Rezeptorendichte wie beispielsweise die Fingerregionen ein überproportional großes Feld im Gyrus einnehmen (vgl. Abb. 6). Die Somatotopie kann sich im Rahmen der kortikalen Plastizität durch zum Beispiel Training einer bestimmten Körperregion oder Amputationen ändern, was durch verschiedene Studien gezeigt werden konnte (Braun et al. 2000, Sterr et al. 1998). Die Afferenzen des ventrobasalen Thalamuskernkomplexes enden in Neuronenkolumnen, die vertikal zur Oberfläche liegen (vgl. Abb.8). Diese Kolumnen sind orts- und sensorspezifisch, so dass eine Kolumne beispielsweise hauptsächlich durch RA-Sensoren einer Körperregion erregt wird. Man vermutet, dass diese Module die periphere Reizdynamik in Echtzeit widerspiegeln, so dass diese Reize bewusst wahrgenommen werden

können und weitere unbewusste Prozesse im Gehirn ausgelöst werden. Von den Kolumnen werden Informationen an andere Kortexareale übermittelt. Beispielsweise gibt es Verknüpfungen zwischen den kontralateralen somatosensorischen Arealen, um Tastempfindungen bilateral wahrzunehmen. Andere Efferenzen kontrollieren über den motorischen Kortex die erfolgte Bewegung. Der sensorische Informationsfluss wird über den Thalamus, die Hinterstrangkern und das Rückenmark gesteuert. Folglich können unwichtige Signale durch descendierende hemmende Bahnen unterdrückt werden. Im parietalen Assoziationskortex kann eine Integration von Wahrnehmungen unterschiedlicher Sinne erfolgen.

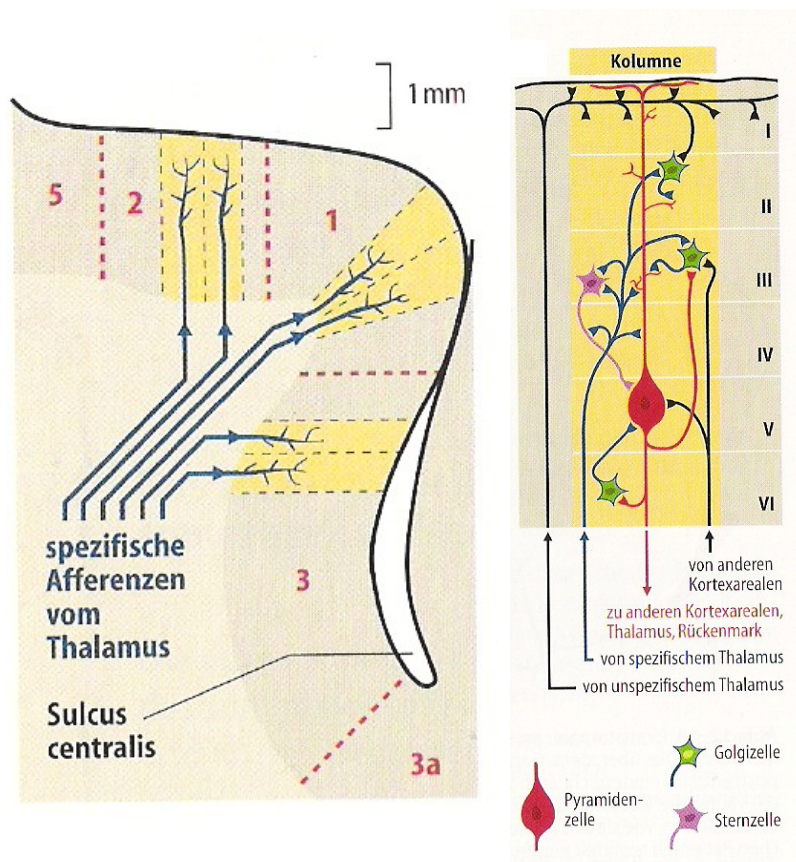


Abb. 8: In der linken Abbildung ist der Gyrus postcentralis mit den Brodmann-Arealen 1, 2 und 3, in welchen je zwei benachbarte Neuronenkolumnen veranschaulicht sind, dargestellt. Rechts ist eine Kolumne mit Pyramiden-, Golgi- und Sternzellen sowie ihren dendritischen Verbindungen schematisch dargestellt (Zimmermann 2005, Seite 313).

Die sekundäre somatosensible Rinde SII befindet sich kaudal und basal des Gyrus postcentralis und wird nach Brodmann (vgl. Abb. 7) in die Area 5 und 7 unterteilt. In SII ist die bilaterale somatotopische Gliederung undeutlicher, wobei das Gesicht weiter vorne und die Füße weiter hinten liegen. Auch hier findet man Neuronenkolumnen, die vertikal zur Oberfläche liegen und ihre Informationen vom Thalamus erhalten. Der sekundäre

somatosensorische Kortex dient der Interpretation der Reize und wahrscheinlich einer Koordination von Sensibilität und Motorik beider Körperhälften (Trepel 1999, Zimmermann 2005).

1.1.8 Prinzipien zur Erhöhung der Auflösung

Innervationsdichte

Die Innervationsdichte spiegelt die Anzahl der afferenten Nervenfasern pro Quadratzentimeter wider. Je höher die Innervationsdichte in einem Gebiet ist, desto höher ist die räumliche Auflösung. Folglich kann man zwei Punkte in einem Gebiet mit einer hohen Innervationsdichte eher als zwei voneinander räumlich getrennte Punkte wahrnehmen als in einem Gebiet mit wenigen Afferenzen pro Quadratzentimeter (Birbaumer und Schmidt 2006, Handwerker 2005).

Rezeptives Feld

Ein Gebiet des Sinnesorgans, welches bei einem adäquaten Reiz nur eine Sensorzelle aktiviert, wird als primäres rezeptives Feld bezeichnet. Beispielsweise sind die rezeptiven Felder der Merkel-Zellen und Meissner-Körperchen kleiner als die der Ruffini- und Pacini-Körperchen. Das sekundäre rezeptive Feld beinhaltet alle afferenten Neurone, die auf ein zentrales Neuron konvergieren. Laufen sehr viele Neurone auf ein zentrales Neuron zusammen, so ist das rezeptive Feld sehr groß. Beim Tastsinn spielt für die gute räumliche Auflösung die Innervationsdichte eine wesentlichere Rolle als die rezeptiven Felder. Je kleiner die rezeptiven Felder sind und je höher die Innervationsdichte ist, desto besser ist die Auflösung. Beispielsweise haben die Neurone des Rumpfes größere rezeptive Felder als die Fingerspitzenneurone, so dass eine genaue Differenzierung einer speziellen Berührung am Rumpf schwieriger ist als eine Berührung an den Fingerspitzen. Ebenfalls haben die Rumpfnurone im somatosensorischen Projektionsfeld des Gehirns größere rezeptive Felder als die Fingerspitzenneurone (Birbaumer und Schmidt 2006, Handwerker 2005).

Laterale Hemmung

Die laterale Hemmung bzw. Inhibition dient zur Kontrastverschärfung. Wird, wie in Abbildung 9 dargestellt, die Haut an zwei räumlich nahe liegenden Stellen sensibel gereizt, so werden verschiedene Neurone aktiviert, die über eine Aktivierung hemmender Interneurone

die Nachbarneurone hemmen. Die Abschwächung der Nachbarneurone erfolgt direkt proportional zur Erregung der Interneurone (Handwerker 2005).

Nicht nur aufsteigende Bahnen können hemmende Interneurone aktivieren, sondern auch deszendierende hemmende Bahnen können die Größe eines rezeptiven Feldes vermindern. Durch den Mechanismus der lateralen Hemmung ist eine Kontrastverschärfung möglich. Dabei wird das Maximum eines Reizes verstärkt, indem Interneurone, welche von den afferenten sensorischen Neuronen erregt werden, die benachbarten Umgebungsneurone hemmen. Das Prinzip der lateralen Hemmung wird vor allem für die Photorezeptoren der Retina postuliert (Birbaumer und Schmidt 2006, Handwerker 2005).

In verschiedenen Studien wird eine laterale Inhibition im primären somatosensorischen Kortex vermutet (Huonker et al. 2005, Iguchi et al. 2005).

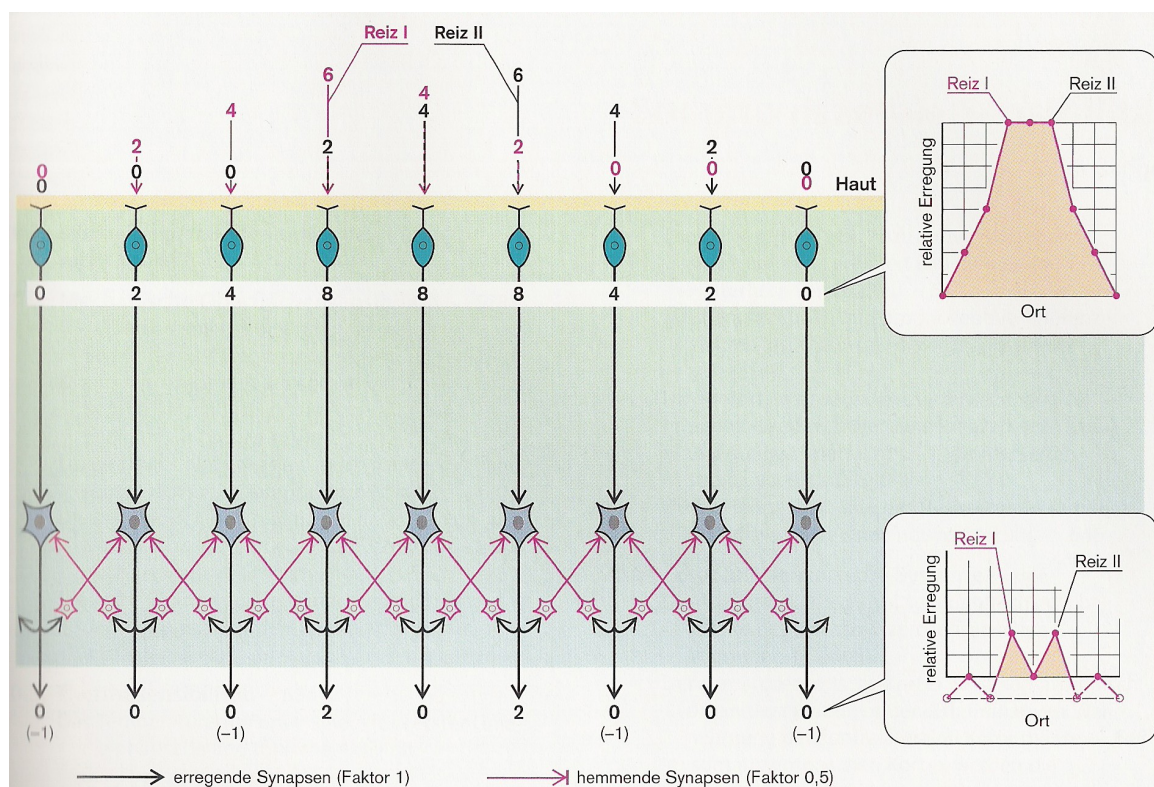


Abb. 9: Die Haut wird an zwei unterschiedlichen Stellen mit einem Reiz derselben Intensität zur gleichen Zeit stimuliert. Die relative Reiz- bzw. Erregungsstärke wird durch die Ziffern symbolisiert. Während die zwei Reize auf Rezeptorebene räumlich nicht voneinander getrennt wahrgenommen werden können, ist mit Hilfe der lateralen Inhibition eine Differenzierung der Reize während der neuronalen Verarbeitung möglich (Klinke 2005, Seite 625).

1.2 Die Aufmerksamkeit

Was Aufmerksamkeit ist, lässt sich nur schwer definieren. „Aufmerksamkeitsprozesse [können] nicht als einheitliche Funktion angesehen werden“, erklärt Walter Sturm in seinem Artikel über die kognitive Kontrolle der Aufmerksamkeitsintensität (2004). Die Aufmerksamkeit dient außerdem als ein Tor für die Informationsverarbeitung im Gehirn. Aufmerksamkeitsleistungen sind von mehreren Faktoren abhängig. Dabei sind Gedächtniskapazitäten, Verarbeitungsgeschwindigkeiten, die allgemeine physiologische Reaktionsbereitschaft des Individuums (Arousal), die Bedeutung des Reizes (Motivation) sowie räumliche und zeitliche Gegebenheiten wichtig (Cohen 1993).

1.2.1 Einteilung der Aufmerksamkeit

Van Zomeren und Brouwer (1994) unterscheiden zwischen Intensitäts- und Selektivitätsaspekt der Aufmerksamkeit. Zum Intensitätsaspekt der Aufmerksamkeit zählen nach Sturm et al. (2004)

1. Alertness
2. Vigilanz
3. Daueraufmerksamkeit.

Die Alertness kann wiederum in die tonische, phasische und intrinsische Alertness untergliedert werden. Während man unter tonischer Alertness die allgemeine im Tagesverlauf schwankende Wachheit meint, versteht man unter phasischer Alertness die Möglichkeit nach einem externen Warnreiz das allgemeine Aufmerksamkeitsniveau zu steigern. Intrinsische Alertness wird als eine selbstverursachte Steigerung des Aktivierungsniveaus angesehen. Bei Vigilanzleistungen muss man über einen sehr langen Zeitraum unter vielen irrelevanten Reizen relevante Stimuli erkennen und darauf reagieren können (beispielsweise beim Autobahnfahren nachts). Demgegenüber ist bei langandauernden Aufgaben mit vielen relevanten Stimuli Daueraufmerksamkeit notwendig (Sturm 2006).

Zu dem Selektivitätsaspekt der Aufmerksamkeit zählen

1. Selektive oder fokussierte Aufmerksamkeit
2. Visuell-räumliche selektive Aufmerksamkeit, Wechsel des Aufmerksamkeitsfokus
3. Geteilte Aufmerksamkeit

Bei der selektiven Aufmerksamkeit, welche in der vorliegenden Studie von den Probanden verlangt wird, werden verschiedenen Reizen unterschiedliche Prioritäten zugeordnet. Die

Ausrichtung der selektiven Aufmerksamkeit kann durch beispielsweise die Erwartung eines speziellen Reizes (interner Faktor) oder durch die Relevanz eines Reizes (externer Faktor) moduliert werden. Bei der selektiven Aufmerksamkeit ist zu beachten, dass eine Abspeicherung der Reizbedingungen durch das Arbeitsgedächtnis notwendig ist. Der Proband muss nicht nur auf die Zielreize reagieren, sondern auch aktiv eine Reaktion auf Störreize unterdrücken können (Sturm 2006). Die selektive Aufmerksamkeit kann in eine perzeptive (James 1890) und eine handlungssteuernde (Allport 1987) Aufmerksamkeitsfunktion unterteilt werden. Während unter perzeptiver Selektion die Verarbeitung der Sinneswahrnehmung und die ständige Interaktion mit der Umwelt verstanden wird, beinhaltet die handlungsbezogene bzw. exekutive Aufmerksamkeit komplexe Verarbeitungsmechanismen zum effizienten Erreichen bestimmter Handlungsziele (Müller und Krummenacher 2006).

Unter der fokussierten Aufmerksamkeit versteht man den Fokus auf einen bestimmten Realitätsausschnitt zu richten, diesen zu analysieren und den Fokus trotz Ablenkungsbedingungen aufrecht zu erhalten.

Posner et al. (1984) ordnen der visuell-räumlichen selektiven Aufmerksamkeit die Fähigkeit zu, sich von einem aktuellen Reiz zu lösen, den Aufmerksamkeitsfokus zu verschieben und einen neuen Reiz zu fixieren.

Mittels der geteilten Aufmerksamkeit können mehrerer Informationen gleichzeitig verarbeitet werden, wenn diese nicht dieselben Kapazitäten für spezielle Aufgaben benötigen. Folglich ist beispielsweise während einer Rechenaufgabe eine visuelle Folgeaufgabe möglich. Eine gegenseitige Störung von zwei Aufgaben ist umso größer, je mehr sich die Analyseareale im Gehirn überlappen (Birbaumer und Schmidt 2006).

1.2.2 Aufmerksamkeitsmodelle

Fan und Posner

Fan und Posner (2004) definieren Aufmerksamkeit als eine Art Organsystem, welches aus drei neuronalen Netzwerken besteht. Diese Netzwerke dienen der Entstehung sowie Aufrechterhaltung von Wachsamkeit, der orientierenden Aufmerksamkeit und der exekutiven Kontrolle. Diese drei neuronalen Aufmerksamkeitsnetzwerke wurden bereits 1990 von Posner und Petersen beschrieben.

Wachsamkeit kann in intrinsische und phasische Alertness unterteilt werden. Während man unter der intrinsischen Aufmerksamkeit die Kontrolle von Wachheit und Arousal – den zentralnervösen Aktivierungsgrad - versteht, ist die phasische Alertness als eine Erhöhung der Antwortbereitschaft nach einem externen Warnreiz definiert. Alertness wird, wie in der Abbildung 10 dargestellt, mit thalamischen, frontalen und parietalen Hirnregionen assoziiert. Es wird vom norepinephrinen System des Locus coeruleus beeinflusst.

Die orientierende Aufmerksamkeit dient zur Selektion eintreffender Reize. Sind Kopf- und Augenbewegungen bei der Orientierung notwendig, spricht man von einer offenen Orientierung (overt orienting). Ist dies nicht der Fall, so wird von einer verborgenen Orientierung (covert orienting) gesprochen. Das Orientierungssystem befindet sich im superioren parietalen Lobus, in der temporal-parietalen Grenzzone und den frontalen Augenfeldern (vgl. Abb. 10). Vermutlich spielt das cholinerge System des basalen Frontalhirns eine wichtige Rolle zur Modulierung des Orientierungssystems.

Die exekutive Kontrolle, welche sich mit komplexen mentalen Prozessen wie beispielsweise Lösungen von Konflikten, Planungen, Entscheidungen oder Fehlererkennung beschäftigt, ist im anterioren Gyrus cinguli und lateralen präfrontalen Kortex lokalisiert (vgl. Abb. 10). Diese Gehirnregionen werden durch das dopaminerge System des ventralen Tegmentum moduliert.

Um den Wirkungsgrad der neuronalen Netzwerke zu bestimmen, wurde ein Aufmerksamkeitsnetzwerk-Test (ANT) entwickelt. Dieser Test misst bei unterschiedlichen Aufgaben Reaktionszeit und Fehlerrate. Während bei Alertness-Aufgaben kurze Reaktionszeiten von etwa 47ms erzielt werden, sind bei Orientierungsaufgaben Reaktionszeiten von circa 51ms und bei Aufgaben, bei denen die exekutive Kontrolle benötigt wird, Reaktionszeiten von etwa 84ms möglich. Zwischen den drei Netzwerken existieren Verbindungen, so dass diese miteinander interagieren können. In einer großen ANT-Studie konnte eine signifikante Korrelation zwischen der Orientierungsaufmerksamkeit und der exekutiven Kontroll-Aufmerksamkeit bestätigt werden. Vielleicht kann der Test eines Tages zur Diagnose eines Aufmerksamkeitsdefizitsyndroms, bei dem eine Störung der Alertness-Funktion vorhanden ist, oder zur Diagnose einer Schizophrenie, bei welcher eine Störung des exekutiven Systems und des Orientierungssystems signifikant nachgewiesen wurde, beitragen (Fan und Posner 2004).

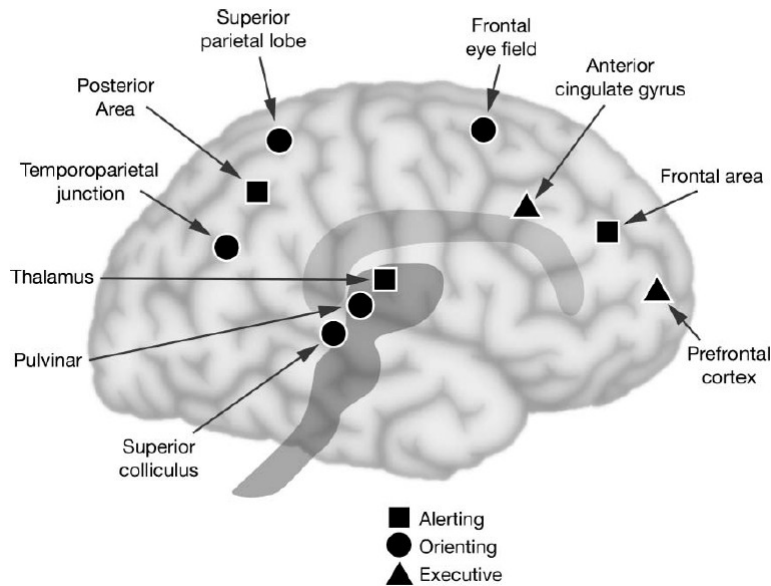


Abb. 10: Anatomische Darstellung der drei Aufmerksamkeitsnetzwerke: Alertness, orientierende Aufmerksamkeit und exekutive Kontrolle (Posner und Rothbart 2007, Seite 6)

LaBerge

LaBerge (1997) geht davon aus, dass mindestens drei verschiedene Gehirnregionen bei Aufmerksamkeitsprozessen in Wechselwirkung miteinander stehen. Dies sind Kolumnen, die für die Aufmerksamkeitsrepräsentation verantwortlich sind, Thalamuskern für die Verstärkung der Aktivitäten in den Aufmerksamkeitskolumnen sowie der Präfrontalkortex, der die Kolumnenauswahl, die Dauer und den Grad der Aktivierung reguliert. Der posteriore Kortex dient hauptsächlich der Wahrnehmung von Reizen, während die anterioren Regionen für die Handlungen zuständig sind. Aufmerksamkeitsprozesse können aber in beiden Kortexarealen stattfinden (LaBerge 1997).

Cohen

Cohen (1993) erklärte, dass Aufmerksamkeit ein mentaler Prozess mit einer räumlich und zeitlich verteilten, modifizierbaren und hierarchischen Struktur ist. Bewusste Aufmerksamkeit entsteht durch viele unbewusste Subprozesse. Cohen beschreibt die Aufmerksamkeit außerdem mit einem Vier-Faktoren-Modell: sie hängt von der sensorischen Selektion, der Antwort-Selektion, der Kapazität und der anhaltenden möglichen Leistung ab.

Unter der sensorischen Selektion wird die Filterung relevanter Reize aus einer Vielzahl von Reizen, die Fokussierung und die automatische Aufmerksamkeitsverschiebung verstanden.

Für die Antwort-Selektion, welche das Antwortvorhaben, die Aktivierung, die Hemmung, die aktive Aufmerksamkeitsverschiebung und die exekutive Überwachungskontrolle beinhaltet, sind anteriore Kortexareale von Bedeutung.

Cohen geht von einer limitierten Aufmerksamkeitskapazität aus, welche unter anderem durch die Gedächtnisstruktur, die nervale Verarbeitungsgeschwindigkeit, die momentane Disposition sowie durch die allgemeine Kortexaktivierung (Arousal) beeinflusst wird. Das Arousal wird durch die mesencephale Retikulärformation (MRF) erzeugt. Die MRF, welche Afferenzen aus fast allen Kortexregionen erhält, wird gemeinsam mit ihren Verbindungen als allgemeines retikuläres Aktivierungssystem (ARAS) bezeichnet. Die retikuläre Formatio dient der anhaltenden Wachheit, der tonischen Muskelanspannung sowie der Verstärkung oder Abschwächung sensorischer oder motorischer Impulse. Zur Formatio reticularis gehören Teile des Mittel- und Hinterhirns, des basalen Vorderhirns und des Thalamus, die zur großflächigen Hemmung bzw. Erregung des Zwischen- oder Großhirns führen (Birbaumer und Schmidt 2006).

Die anhaltende mögliche Leistung bzw. die Daueraufmerksamkeit ist ein Endprodukt der bereits beschriebenen drei Faktoren. Die Daueraufmerksamkeit ist für die Vigilanz sowie für die Ermüdbarkeit von Bedeutung.

Cohens Modell basiert auf Patientenbeispielen. In jüngster Zeit wurde das Modell in einer Studie mit gesunden Probanden im Allgemeinen bestätigt (Gunstad et al. 2006).

Mesulam

Mesulam (1981) geht als Grundlage der Aufmerksamkeitsprozesse von einem retikulären System, das Arousal und Wachheit hervorruft, aus. Er beschreibt außerdem drei Hirnregionen, die für Aufmerksamkeitsprozesse von Bedeutung sind und untereinander in Wechselwirkung stehen. Der posteriore parietale Kortex dient der sensorischen Repräsentation der Umwelt, der laterale Frontalkortex ist für die motorische Komponente der Aufmerksamkeit zuständig, während der anteriore Gyrus cinguli dem Reiz seine Bedeutung zuordnet. Mesulam postuliert wie Posner und Petersen (1990) eine hohe Bedeutung des rechten parietalen und cingulären Kortex für die räumliche Aufmerksamkeit. Die Vorstellung von Posner und Petersen (1990) ist, dass der Gyrus cinguli für die Target-Entdeckung verantwortlich ist. Laut der Theorie von Mesulam ist der anteriore Gyrus cinguli für die motivationale Reizbedeutung zuständig. Mesulam unterteilt den Prozess der Target-Entdeckung in einen motivationellen Teil für die Reizbedeutung und in einen motorischen Teil für die Reizantwort (Mesulam 1981, Mesulam 1998).

1.2.3 Verarbeitung der Aufmerksamkeit

Laut Broadbents Filtertheorie (1958), die den Ausgangspunkt für spätere Vorschläge bildete, erreichen zwei gleichzeitig dargebotene Reize simultan einen sensorischen Speicher.

Allerdings gelangt nur ein Reiz auf Grund seiner physikalischen Charakteristika durch den selektiven Filter. Der zweite Reiz wird blockiert und kann für eine mögliche spätere Benutzung vorübergehend im Speicher verweilen. Der Filter schützt durch seine Funktion das kapazitätslimitierte Verarbeitungssystem vor Überlastung. In das kapazitätslimitierte System eingehende Informationen werden gründlich verarbeitet, können bewusst und im Langzeitgedächtnis gespeichert werden (Müller und Krummenacher 2006).

Eine Alternative zur Filtertheorie stellt die Attenuationstheorie von Treisman (1960) und die Theorie der späten Selektion von Deutsch und Deutsch (1963) dar (Anderson 2001).

Bei einem Experiment von Treisman wurden Probanden angewiesen, ein Ohr zu beschatten, dem inhaltlich sinnvolle Informationen mitgeteilt wurde. Im Anschluss sollten sie das Ohr, auf dem eine zufällige Wortfolge zu hören war, beschatten, während die sinnvollen Informationen mit dem anderen Ohr zu hören waren. Entgegen der Instruktionen gaben einige Probanden die inhaltlich sinnvolle Mitteilung wieder. Folglich sind für die Auswahl der zu verarbeitenden Informationen nicht nur die physikalischen Merkmale sondern auch der semantische Inhalt entscheidend. Folglich entwickelte Treisman 1964 eine Dämpfungstheorie, die von einer Abschwächung statt einer Herausfilterung unwichtiger Informationen ausging (Treisman 1964). Die eingehenden Informationen durchlaufen hierarchisch unterschiedliche Verarbeitungsstufen, wobei das erreichte Analyseniveau von der verfügbaren Verarbeitungskapazität abhängig ist (Müller und Krummenacher 2006).

Bei der Theorie der späten Selektion werden alle eingehenden Informationen vollständig analysiert. Allerdings werden nur aufgabenrelevante Reize weiterverarbeitet, so dass die eingehenden Informationen nach ihrer Relevanz vorab gewichtet werden müssen.

Entscheidend für die Reizselektion ist folglich nicht die begrenzte Kapazität des Wahrnehmungssystems sondern des Reaktionssystems (Deutsch und Deutsch 1963).

Die sich ergebende Frage, ob eine Selektion der eingehenden Informationen früh oder spät stattfindet, kann bisher noch nicht eindeutig beantwortet werden. Vermutlich hängt die Lokalisation der Aufmerksamkeitsselektion von der Aufgabe selbst ab. Wird für eine Aufgabe nur wenig Aufmerksamkeit benötigt, so werden möglicherweise mehr irrelevante Reize mitverarbeitet, als wenn die Anforderung an die Aufmerksamkeit hoch ist (Lavie 1995).

Nach der „Bottom-up“-Theorie kann die Aufmerksamkeit durch spezifische Reize automatisch hervorgerufen werden. Hingegen sind für die „Top-down“-Aufmerksamkeit gespeicherte Zusammenhänge notwendig, um eine Verstärkung oder Abschwächung der Reize zu bewirken (Birbaumer und Schmidt 2006).

Broadbent ging davon aus, dass bestimmte Reize nur zu unserem Kurzzeitgedächtnis gelangen, wenn sie einen Filter passiert haben. Folglich nimmt man bei einer Gesellschaft nur die lauten Personen bzw. die Personen, denen man besondere Aufmerksamkeit schenkt, bevorzugt wahr. Allerdings wurde beobachtet, dass man beispielsweise seinen eigenen Namen aus vielen gleichzeitigen verrauschten Gesprächen bewusst wahrnimmt.

Aufmerksamkeitsprozesse erfolgen daher vermutlich nicht über eine frühe Herausfilterung wichtiger Signale sondern durch eine übergeordnete Bewertung der Reize (Birbaumer und Schmidt 2006).

Alle eintreffenden Reize werden in einem sensorischen Gedächtnis für wenige Millisekunden gespeichert. Es erfolgt eine Erkennung wesentlicher Merkmale (Mustererkennung), eine Enkodierung und ein Vergleich. Ist der Reiz in einem abgespeicherten Reiz-Reaktions-Muster wieder zu finden, so erfolgt eine automatische Reaktion. Ist der Reiz unbekannt oder erfordert er alternative Reaktionen, so wird das limitierte Kapazitätskontrollsystem (LCCS) aktiviert. Das LCCS führt zu einer Erregung von Systemen für die Informationsverarbeitung und Reaktionsplanung, welche von der Motivation abhängt. Je bedeutsamer ein Reiz ist, desto stärker sind die Erregung und die willentliche Anstrengung. Weicht der Reiz vom gespeicherten Reiz-Reaktions-Modell ab, so erfolgt eine Unterbrechung der ablaufenden Operation. Ist die Abweichung des Reizes vom Reiz-Reaktions-Modell sehr groß, so ist eine intensive Orientierungsreaktion erforderlich (Birbaumer und Schmidt 2006).

1.2.4 Neuroanatomische Grundlagen des Aufmerksamkeitsprozesses

Für Prozesse der Aufmerksamkeit ist ein Zusammenspiel verschiedener Hirnmodule notwendig. Die Steuerung der phasischen Aufmerksamkeit erfolgt durch den Nucleus reticularis des Thalamus, den Präfrontalkortex, den Parietalkortex, den Gyrus cinguli sowie durch Teile der Basalganglien. Der Nucleus reticularis thalami stellt das Tor zum Kortex dar, so dass nur ein Teil der Informationen weitergeleitet wird (gating). Vorher erfolgt aber die Analyse aller Informationen in den Projektionsarealen des Neocortex. Der Nucleus reticularis ist somatotopisch organisiert und kann spezifische Thalamuskernse selektiv hemmen. Folglich ist er für die selektive Aufmerksamkeit notwendig. Außerdem hat er afferente und efferente

Verbindungen zur *Formatio reticularis*. Die Verbindungen zwischen den spezifischen und unspezifischen Thalamuskernen können durch kortikothalamische Neurone beeinflusst werden. Bei phasischen Aufmerksamkeitsprozessen lassen sich neben der Aktivierung der kortikothalamischen Bahnen auch Aktivitäten im anterioren Cingulum und dorsolateralen Frontalkortex feststellen. Eine erhöhte Erregbarkeit des posterioren parietalen Kortex und des lateralen präfrontalen Kortex wird bei visuellen Aufmerksamkeitsverarbeitungen durch das Pulvinar ermöglicht. Weiterhin dienen Verbindungen zwischen dem Präfrontalkortex und dem sekundären sowie tertiären Assoziationskortex für Aufmerksamkeitsprozesse und Bewusstsein. Zur Reizerkennung ist eine Aktivierung von primären Projektionsarealen und dem zugehörigen Assoziationskortex notwendig. Sekundäre und tertiäre Assoziationskortexe, in welchen Informationen gespeichert sind, weisen Verbindungen zu den limbischen Strukturen und Basalganglien auf, welche zur Einschätzung der Reizrelevanz dienen. Daher ist ein Vergleich zwischen gespeicherten und neuen Informationen möglich. Außerdem dienen die Assoziationskortexe der Prioritätensetzung, dem Loslösen von einem alten Reiz und der Umlenkung der Aufmerksamkeit auf andere Reize. Die inferiore parietale Region vergleicht die Reize und informiert frontale und temporale Regionen über die Reizbedeutung, welche das Filtersystem des Nucleus reticularis thalami durch hemmende Neurone modulieren. Der dorsolaterale Frontalkortex dient als Teil des Arbeitsgedächtnisses dem Aufrechterhalten der kreisenden Erregungen zwischen Thalamus und Assoziationskortexen, die zu einer bewussten Wahrnehmung der Informationen führen. Der anteriore Gyrus cinguli wird bei Fehler-Erkennungen oder schwierigen Entscheidungen aktiviert. Hingegen ist bei der passiven Beobachtung von Reizen keine Aktivierung feststellbar. Der Gyrus cinguli und der mediale sowie orbitale präfrontale Kortex (PFC) treffen die Entscheidung über eine selektive Öffnung thalamischer Tore und damit verbundener Reizweiterverarbeitung. Die Informationen über die Verteilung der Erregung im Neokortex werden über die Basalganglien an den Nucleus reticularis thalami zurückgeleitet und können eine Schließung der thalamischen Tore bewirken. Der Nucleus reticularis thalami, die mesencephale *Formatio reticularis* (MRF), der Gyrus cinguli, der präfrontale Kortex und die Basalganglien zählen somit zum limitierten Kapazitätskontrollsystem (LCCS) (Birbaumer und Schmidt 2006).

1.2.5 Störungen der Aufmerksamkeit

Etwa 80% aller Hirnschädigungen haben eine Aufmerksamkeitsstörung als Folge, so dass die Patienten sich beispielsweise schneller ablenken lassen und ihre Reaktionsfähigkeit vermindert ist (Sturm 2006).

Bei einem Neglect ist man unfähig sensorische Impulse aus der kontralateralen Raumhälfte wahrzunehmen. Dieses Phänomen tritt bei einer Läsion des Parietallappens, des Thalamus, des Mittelhirns und verschiedener anderer Kortexregionen auf.

Eine Studie mit Parietallappengeschädigten Patienten weist darauf hin, dass obere Areale des Parietallappens für die visuelle Aufmerksamkeit zuständig sind. Neglect-Patienten weisen in CT-Studien eher eine Schädigung des unteren Parietallappens auf. In PET-Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass der obere Parietallappen bei verdeckten

Aufmerksamkeitsverschiebungen aktiviert wird (Corbetta et al. 1993). Dabei konnte man beobachten, dass bei einer Aufmerksamkeitsverschiebung auf visuelle Reize des linken Gesichtsfeldes der rechte Parietallappen aktiviert wurde. Wurde die Aufmerksamkeit auf die rechte Gesichtshälfte gerichtet, wurden sowohl der linke als auch der rechte Parietallappen aktiviert. Diese Ergebnisse unterstützten die klinischen Beobachtungen des Neglects, der vorrangig bei einer Läsion des rechten Parietallappens auftrat (Posner und Raichle 1996).

Auch das Mittelhirn ist für die Aufmerksamkeitsverschiebung wichtig, so dass bei einer Degeneration der Prozess der Aufmerksamkeitsverschiebung verlangsamt wird. Dies wurde durch Studien mit Patienten, die eine progressive supranucleäre Blicklähmung (Steele-Richardson-Olszewski-Syndrom) und folglich eine Schädigung des Colliculus superior haben, nachgewiesen (Posner und Raichle 1996).

Nach der Hypothese von Francis Crick (1984) verstärkt der Thalamus die Informationen, auf welche man seine Aufmerksamkeit richtet. Diese Behauptung wird durch Untersuchungen von Patienten mit einer Thalamusläsion bekräftigt, da die Patienten nur verlangsamt ihre Aufmerksamkeit auf kontralaterale Zielreize richten konnten. LaBerge und Buchsbaum (1990) vermuten, dass der Pulvinar eine Filterfunktion bezüglich wichtiger und unwichtiger visueller Reize besitzt, da bei Aufmerksamkeit auf wichtige visuelle Reize eine stärkere Glukoseaufnahme im kontralateralen Pulvinar in ihren PET-Untersuchungen zu verzeichnen war.

Durch exekutive Aufmerksamkeitsnetzwerke im Bereich des Gyrus cinguli ist eine Übertragung der Wahrnehmung in ein Bewusstwerden des Objektes möglich. Bei einer

Schädigung im vorderen Gyrus cinguli trat ein akinetischer Mutismus auf, so dass diese Patienten zwar Reize wahrnehmen aber nicht darauf reagieren konnten. Da die Patienten sich von der Schädigung erholen, scheinen noch andere Hirnregionen für die exekutive Aufmerksamkeit verantwortlich zu sein. Das exekutive Aufmerksamkeitsnetzwerk dient der visuellen Orientierung und Verarbeitung visueller Merkmale sowie der Kontrolle des Arbeitsgedächtnisses (Posner und Raichle 1996).

Zur Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit müssen Wachsamkeitsnetzwerke aktiviert werden, welche sich laut PET-Studien im rechten Frontal- und Parietallappen befinden. Patienten mit Schädigungen in diesen Hirnbereichen haben Schwierigkeiten, dauerhaft aufmerksam zu sein (Posner und Raichle 1996).

Durch eine Schädigung der Formatio reticularis oder der rechten Hirnhemisphäre kann die Intensitätsdomäne der Aufmerksamkeit gestört sein. Folglich haben Patienten Probleme bei der Aktivierung und Aufrechterhaltung der Aufmerksamkeit (Sturm 2006).

Mit spezifischen Trainingsprogrammen kann man Aufmerksamkeitsstörungen therapieren. Dazu sind aber eine genaue Diagnose der Störungsart sowie eine spezifische Therapie notwendig. Wegen der zunehmenden Relevanz des Aufmerksamkeitsdefizitsyndroms soll auf dieses klinische Erscheinungsbild einer Aufmerksamkeitsstörung im Folgenden näher eingegangen werden.

Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom

Das Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom (ADS) ist umgangssprachlich mit dem „Zappelphilipp-Syndrom“ gleichzusetzen. Als Ursachen für diesen typischerweise im Kindergartenalter beginnenden Symptomkomplex werden neben einer genetischen Disposition und gestörten Verhältnissen in der Familie auch eine Überforderung, Reizüberflutung und ein frühkindlicher Hirnschaden diskutiert. Vermutlich spielt auch ein Dopaminmangel sowohl in dem Frontalhirn als auch in den Basalganglien eine Rolle bei der Entstehung der Erkrankung. Klinisch erkennt man die betroffenen Kinder an gehäuftem frühkindlichen Schreien, Konzentrationsstörungen, psychomotorischer Unruhe, Stimmungsschwankungen, Impulsivität und Wutausbrüchen. Sie verletzen oft Regeln und sind leicht erregbar. Außerdem passieren ihnen gehäuft Unfälle. In etwa einem Viertel der Fälle können die Kinder bestimmte Defizite in ihrer Entwicklung vorweisen, so dass einige unter einer Lese- und Rechtschreibschwäche, einer Tic-Störung, einer Dyskalkulie oder einer Enuresis nocturna (Bettnässen) leiden. Als Komplikationen können schlechte schulische Leistungen und ein verstärktes Suchtverhalten auftreten. Zur Diagnose der Erkrankung nutzt man neben der Anamnese und

Verhaltensbeobachtung auch einige psychologische Tests (IQ-Hawik, FBB-HKS, Conners-Bogen). Außerdem ist eine Ausschlussdiagnostik mit Hilfe von Laborparametern, EKG, EEG sowie Seh- und Hörtests durchzuführen. Wird ein Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom festgestellt, so versucht man die betroffenen Kinder primär mit einem psychomotorischen Training sowie einer Verhaltenstherapie zu behandeln. Im Schulalter werden teilweise Psychostimulanzien (Methylphenidat, Pemolin), Noradrenalin-Wiederaufnahmehemmer (Atomoxetin), Antidepressiva (Reboxetin, Desipramin, Bupropion), Neuroleptika (Risperidon) oder beta-Rezeptorenblocker (Propanolol) zur Unterstützung der Therapie eingesetzt. Trotz den vielfältigen Therapiemaßnahmen zeigen etwa ein Drittel der Patienten im Erwachsenenalter Defizite in der Konzentration. Außerdem können bei einer medikamentösen Behandlung mit Methylphenidat einige Nebenwirkungen wie beispielsweise Schlaflosigkeit, Kopf- und Magenschmerzen, Angstzustände, Gewichts- und Appetitminderung, Thrombozytopenie sowie Medikamentenmissbrauch auftreten. Pemolin als Alternative ist allerdings lebertoxisch und somit Medikament der zweiten Wahl. Durch die schwierige und nebenwirkungsreiche Therapie ist es wichtig, ein Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom mit einer hohen Sicherheit zu bestimmen. Daher ist eine Weiterentwicklung der Diagnosemethoden unbedingt erforderlich. Durch Studien über Aufmerksamkeitsprozesse im Gehirn wird es sicherlich in naher Zukunft möglich sein, ein Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom objektiv mittels Messungen der Hirnaktivität zu diagnostizieren (Gleixner et al. 2006/7).

1.3 Methoden zur Messung der Hirnaktivität

Zur Messung der Hirnaktivität sind sowohl invasive als auch nicht-invasive Techniken möglich. Bei invasiven Messungen ist die Gabe einer radioaktiven Substanz notwendig. Funktionelle Kernspintomographie (fMRI), Magnetoenzephalographie (MEG) und Elektroenzephalographie (EEG) ermöglichen eine nicht invasive Messung der Hirnaktivität, während Positronenemissionstomographie (PET) und Single-Photon-Emissions-Computertomographie (SPECT) invasive Messmethoden darstellen. Die Grundlage der Hirnaktivitätsmessung (z.B. Neurotransmitterfluss) stellt eine Veränderung neurophysiologischer Parameter (z.B. Energieverbrauch) dar, welche Signalunterschiede (z.B. Magnetfeldschwankungen) erzeugen können. Man geht davon aus, dass mentale Vorgänge mit der Hirnaktivität assoziiert sind. Diese Messmethoden ermöglichen dadurch unter anderem Kausal- oder Korrelationsanalysen von mentalen Prozessen (Jacobs 2006).

PET

Bei der PET werden die injizierten Moleküle mit einem Positronenstrahler markiert. Die Positronen stoßen mit einem Elektron zusammen und erzeugen somit zwei Gamma-Quanten, welche detektiert werden. Die applizierten Positronenstrahler sind sehr kurzlebig, so dass nach der Untersuchung so gut wie kein Radionuklid im Körper zurückbleibt. Nachteilig ist aber, dass der Positronenstrahler ortsnahe hergestellt und schnellstmöglich appliziert werden muss. Die PET ist für eine Erforschung von Funktionsprozessen im Körper notwendig. Die erreichbare Auflösung liegt zwischen 2 und 5mm (Dössel 2000).

SPECT

Die SPECT ist ein Schnittbildverfahren, bei dem die Aktivitätsverteilung im Körper rekonstruiert wird. Das Aufnahme- und Rekonstruktions-Verfahren entspricht dem Röntgen-CT. Als Detektor dient die Gamma-Kamera. Die Methode findet vor allem bei der Vitalitätsdiagnostik des Herzens Anwendung. Die Auflösung liegt meistens zwischen 5 und 10 mm (Dössel 2000).

fMRI

Bei der funktionellen Magnetresonanztomographie wird das Desoxyhämoglobin mit seinen paramagnetischen Eigenschaften als ein körpereigenes Kontrastmittel genutzt. In Gebieten mit hohem Desoxyhämoglobingehalt zeigt sich in der T2-Wichtung eine Signalabnahme. Diese Methode kann auch als BOLD-Imaging (Blood Oxygen Level Dependency) bezeichnet werden. Sie findet vor allem in der Untersuchung von sensorischen und motorischen Zentren Anwendung (Dössel 2000).

EEG

Mittels der EEG werden durch Elektroden an der Haut elektrische Potentiale registriert. Klassisch werden 8 bis 12 Ableitungen vorgenommen. Um Bilder aus den Signalen zu rekonstruieren sind allerdings viel mehr Ableitungen notwendig (Dössel 2000).

MEG

Die MEG misst biomagnetische Signale mit Hilfe der SQUID-Sensoren (Superconducting Quantum Interference Device). Zur Messung der sehr kleinen Signale ist eine effektive Störsignalunterdrückung sowie ein gutes Signal-Rausch-Verhältnisses notwendig (Dössel 2000). In der Abbildung 11 ist eine Messung der Gehirnaktivität mittels der

Magnetoenzephalographie dargestellt.

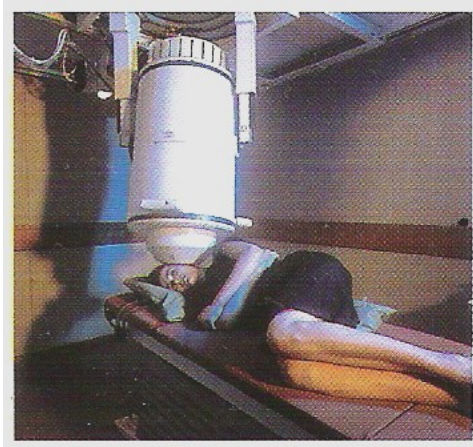


Abb.11: Messung magnetischer Felder über einer Hirnhemisphäre mittels der Magnetoenzephalographie (Fabra 1996, Seite 33).

Da in der vorliegenden Studie die Hirnaktivität mittels MEG gemessen wurde, soll auf diese Untersuchungsmethode näher eingegangen werden.

1.4 MEG

1.4.1 Dipolentstehung

Der Dipol spiegelt die synchrone postsynaptische Aktivität tausender Neurone aus einem kleinen Bereich weniger Millimeter wider. Apikale Dendriten werden durch exzitatorische postsynaptische Potentiale afferenter Neurone depolarisiert, so dass positiv geladene Natriumionen in die Nervenzelle einströmen und ein extrazelluläres negatives Feldpotential hinterlassen wird. Der Primärstrom fließt innerhalb der Nervenzelle in Richtung Soma (Quelle), wo eine geringere Depolarisation vorherrscht. Außerhalb der Nervenzelle wird der Strom vom extrazellulär positiven Somabereich zum extrazellulär negativen Dendritenbereich geleitet (Volumenstrom). Durch EEG-Elektroden können die entstandenen Spannungsänderungen gemessen werden (Birbaumer und Schmidt 2006).

1.4.2 Mess- und Analysemethode

Durch die Entstehung elektrischer Aktivitäten im Gehirn ist es möglich, die dadurch entstehenden magnetischen Felder mit einer speziellen Messmethode zu messen. Für diese Messung wird ein Magnetometer möglichst nahe über den Kopf des Probanden gebracht. Die biomagnetischen Felder, die man mit der Magnetoenzephalographie bestimmen kann, sind sehr klein. Sie liegen im Bereich von einigen zehn Pikotesla ($1\text{pT} = 10^{-12}\text{T} = \text{ca. } 10 \text{ Millionen fache kleiner als das Erdmagnetfeld}$) und einigen wenigen Femtotesla ($1\text{fT} = 10^{-15}\text{T} = \text{ca. } 10 \text{ Milliarden fache kleiner als das Erdmagnetfeld}$), so dass man ein sehr sensitives Messsystem braucht (Büchel und Weiller 2006, Dössel 2000).

Die so genannten SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Device) müssen als Sensoren ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis gewährleisten, weil die biomagnetischen Felder sehr klein sind. Diese supraleitenden Quanteninterferenzdetektoren (SQUIDs) bestehen aus einem supraleitenden Ring und zwei schwach supraleitenden Verbindungen (Josephson-Kontakte). Die Einkoppelspule dient dem Einkoppeln des im Gradiometer detektierten Flusses. Dadurch entsteht im SQUID-Ring ein Abschirmstrom, der durch eine quantenphysikalische Wellenfunktion beschrieben werden kann. Die SQUIDs werden als supraleitende Sensoren durch Helium bei etwa $4,2\text{K} (= -269,0^\circ\text{C})$ abgekühlt (Büchel und Weiller 2006, Dössel 2000).

Problematisch ist, dass die Messung durch Umgebungseinflüsse (Erdmagnetfeld: $\text{ca. } 50 \mu\text{T} = 5 \times 10^{-5}\text{T}$) gestört wird. Daher liegt der Proband während der Messung in einer ferromagnetisch abgeschirmten Kammer.

Ein Gradiometer dient der Störsignalunterdrückung. Er besteht aus zwei gegensinnig gewickelten supraleitenden Spulen. Detektiert das Gradiometer nahe gelegene Quellen, welche relativ starke räumliche Änderungen aufweisen, so entsteht ein großer Gradient zwischen den zwei supraleitenden Drahtschlaufen. Wird allerdings das Magnetfeld von weiter entfernt liegenden homogenen Störquellen hervorgerufen, so wird in beiden Drahtschlaufen das gleiche Signal erzeugt, welches durch Subtraktion im Gesamtkreis Null wird (Büchel und Weiller 2006, Dössel 2000). Weiterhin dienen Filter der Unterdrückung von Störsignalen.

Zur Analyse der Daten werden alle von jeweils einem Kanal gemessenen Signale für bestimmte Stimulus-Arten über alle Wiederholungen gemittelt. Dadurch erfolgt eine Verbesserung der Signal-Rausch-Verhältnisse. Diese Methode kann als eine Analyse der

evozierten Felder bezeichnet werden. Aus den verschiedenen Signalen können mit Hilfe der Dipollokalisierung die räumlichen Quellen rekonstruiert werden (Büchel und Weiller 2006).

Das Ziel der Messung ist eine Darstellung und Bestimmung eines Stromdipols, in dem sich die bioelektrischen Ströme widerspiegeln. Um Stärke und Richtung des Stromdipols darstellen zu können, sind diskrete Volumenelemente notwendig. Je gröber der Körper in Volumenelemente eingeteilt wird, desto unspezifischer ist der Dipol (Dössel 2000).

1.4.3 Das inverse Problem

Es gibt stets eine eindeutige Lösung, wenn man aus einer Stromdipolverteilung ein Magnetfeld berechnen will. Allerdings steht man bei der magnetoenzephalographischen Messung gerade vor dem umgekehrten Problem: aus einem Magnetfeld ist eine Stromdipolverteilung zu berechnen. Aus dem gemessenen magnetischen Feld ist keine eindeutige Rückrechnung auf die erzeugende Stromverteilung möglich, weil unendlich viele Quellenkonfigurationen möglich sind. Folglich sind Annahmen über den Quellencharakter (Quellenmodell) und über die Leitfähigkeit des Volumens, in welchem die Quellen vorkommen können (Volumenleitermodell) notwendig, um die Anzahl der möglichen Lösungen auf eine angemessene Anzahl zu beschränken (Balish und Muratore 1990).

1.4.4 Quellenmodelle

Mittels der Dipolbestimmung im Zeitraum des interessierenden Prozesses möchte man die Strukturen erkennen, die für bestimmte Funktionen die Auslöser darstellen. Beim Äquivalent-Strom-Dipol-Modell werden von möglichen Stromdipolen sukzessive die dazugehörigen Magnetfelder berechnet. Wenn die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen den gemessenen magnetischen Feldern und den vorwärts berechneten Feldern minimal ist, so stellt dies die Lösung des inversen Problems dar (Dössel 2000, Ducla-Soares 1990).

Bei dem Strom-Dipol-Modell geht man davon aus, dass das gemessene magnetische Feld direkt proportional zum Dipolmoment (Dipolstärke) und indirekt proportional zum Quadrat des Abstandes ist (Pizzella und Romani 1990). Folglich ist das gemessene magnetische Feld umso größer, je größer die Dipolstärke ist und je kleiner der Abstand zwischen Messgerät und Kopfoberfläche ist. Außerdem geht man davon aus, dass viele Pyramidenzellen in einem kleinen Gebiet bei einer fokalen Kortexaktivierung synchron erregt werden und dadurch ein makroskopisches Magnetfeld entsteht, welches als Dipolfeld modelliert werden kann (Pizzella

und Romani 1990). Dieses Strom-Dipol-Modell ist allerdings nur für frühe Erregungszeitpunkte anwendbar. Die Dipolmodelle können durch die Festlegung einiger Parameter variiert werden. Beim „Fixed Dipole“ sind Richtung und Ort des Dipols festgelegt. Es kann nur die Dipolstärke geändert werden. Hingegen ist beim „Rotating Dipole“ nur der Ort festgelegt, Richtung und Stärke sind variabel. Der „Moving Dipole“ ändert sowohl Richtung, Stärke als auch Ort im Laufe der Zeit bis die beste Passung gefunden wird.

1.4.5 Volumenleitermodelle

Mit Hilfe von Volumenleitermodellen versucht man das Gebiet, in dem extrazelluläre Ströme entstehen und Magnetfelder erzeugt werden, einzugrenzen. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Gewebsleitfähigkeit werden verschiedene Volumenleitermodelle, wie das BEM (Boundary-Element-Method)-Model oder das Kugel-Model, genutzt. In mehreren Studien hat sich die Kugel als Volumenleitermodell für Untersuchungen des somatosensorischen Kortex als ausreichend erwiesen (Ducla-Soares 1990). Mit dem abstrakten Kugelmodell können nur tangentielle Dipolkomponenten untersucht werden. Realistische Volumenleitermodelle sind bei Untersuchungen des Frontal- und Temporallappens notwendig, da sie der Geometrie des Schädels besser angepasst sind (Ducla-Soares 1990). Folglich ist die Fragestellung für die Auswahl des Volumenleitermodells entscheidend. Zur Erstellung der Volumenleitermodelle ist ein individuelles Magnetresonanztomogramm vorteilhaft, da so die Quellen anatomischen Strukturen zugeordnet werden können (Dössel 2000).

1.4.6 Anwendung

Durch die Darstellung der Stromdipole werden funktionelle Abläufe im menschlichen Körper veranschaulicht. Im Gegensatz dazu kann man mit der Computer-Tomographie und der Magnetresonanztomographie die Morphologie des Körpers darstellen. Durch die MEG können Leitungsbahnen im Herzen, die Herzrhythmusstörungen verursachen können, lokalisiert werden, um eine Radiofrequenzablation zur Unterbrechung dieser Bahnen vornehmen zu können. Außerdem ist eine Lokalisation epileptischer Foci im Gehirn möglich. Die MEG ist eine wichtige Methode, um Zusammenhänge zwischen dem Verhalten und dem Gehirn zu erforschen. Es gibt noch viele potentielle Anwendungsgebiete im kardiologischen

und neurologischen Bereich sowie in der pränatalen Diagnostik (Birbaumer und Schmidt 2006, Dössel 2000).

1.4.7 Vergleich der EEG und der MEG

Durch die gleichzeitigen Neuronenentladungen im Gehirn entstehen Stromflüsse. Diese bewirken Potentialschwankungen, die an der Kortexoberfläche mittels EEG ableitbar sind (Birbaumer und Schmidt 2006, Dössel 2000).

Aus den Stromflüssen resultieren Magnetfelder, welche mittels MEG gemessen werden können. Die apikalen Dendriten der Laminae I und II sind Orte der EEG- und MEG-Entstehung. Durch die EEG und MEG ist eine Messung der Gehirnaktivität im Millisekunden-Bereich möglich.

Die Messung biomagnetischer Felder weist einige Vorteile auf. Es werden hauptsächlich nur Magnetfelder gemessen, die durch intrazelluläre Ströme entstanden sind. Hingegen werden die durch EEG gemessenen Potentialverteilungen durch Volumenströme erzeugt.

Die Messung magnetischer Felder ist sehr genau, da die Feldverteilung, welche durch die Zielquelle hervorgerufen wird, nur gering durch andere, weiter entfernt liegende Quellen beeinflusst wird. Allerdings werden einfache Quellen zu einer eindeutigen

Quellenlokalisation vorausgesetzt. Die EEG wird durch weit von der Quelle entfernte Volumenströme relativ stark beeinflusst, so dass die räumliche Auflösung geringer ist. Mittels des Kugelmodells werden bei der MEG nur Magnetfelder gemessen, die durch tangentielle Dipole hervorgerufen werden (Rose und Ducla-Soares 1990). Diese können durch radiale oder horizontale zur Kortexoberfläche gelegene Ströme ausgelöst werden und entstehen vorrangig in den Seitenwänden der Sulci (Birbaumer und Schmidt 2006). Liegen die Ströme senkrecht zur Oberfläche, so können an der Kopfoberfläche nur kleine magnetische Felder gemessen werden. Diese radialen Dipole, welche häufig durch Neurone am Sulcigrund oder Kamm ausgelöst werden, können hauptsächlich durch die EEG erfasst werden. Optimal ist also eine Ableitung der EEG und MEG gleichzeitig, da beide Verfahren zusammen die zueinander komplementären Ströme erfassen können (Dössel 2000).

Ein Nachteil der MEG gegenüber der EEG sind die Kosten. Während derzeit ein EEG-Gerät mit ca. 40 Kanälen etwa 16 000 Euro kostet, muss für das MEG-Gerät mit ca. 300 Kanälen die hundertfache Summe von etwa 1 600 000 Euro investiert werden.

1.4.8 Ausblick

Derzeit beschränken sich viele MEG-Studien auf die Zuordnung von Dipolen zu anatomischen Strukturen. Allerdings liegt der Vorteil der MEG gerade in der hohen zeitlichen Auflösung, so dass in naher Zukunft sicherlich mehr Studien über die zeitliche Abfolge von Erregungsvorgängen im Gehirn stattfinden werden (Büchel und Weiller 2006).

In der vorliegenden Studie wurden die Gehirnaktivitäten mittels der MEG gemessen, weil die MEG für Signale nahe des zentralen Sulcus wie bspw. somatosensorische evozierte Felder der Hände, der Finger oder des Gesichts besser geeignet ist als die EEG (Rose 1990).

1.5 Ereigniskorrelierte Hirnpotentiale (EKP)

Elektrische oder magnetische Signale, die man vor, während oder nach einem Zeitpunkt eines psychischen Ereignisses über dem Gehirn mittels EEG oder MEG ableiten kann, werden ereigniskorrelierte Hirnpotentiale genannt. Diese Potentiale werden durch eine zeitsynchrone Mittelung und eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses aus der Hintergrundaktivität herausgefiltert. Sie weisen eine Abfolge charakteristischer Komponenten auf, die teilweise Phasen der Informationsverarbeitung widerspiegeln. Diese Komponenten werden durch ihre Amplitude und durch ihre Latenzzeit nach somatosensibler Reizung charakterisiert.

Bereits ab einer Latenz von 20ms nach elektrischer Stimulation des Nervus medianus konnte man im kontralateralen primären somatosensorischen Areal evozierte Signale (N20) ableiten. Aktivitäten im SI-Kortexareal traten bei Mauguière et al. (1997a) insgesamt mit einer Latenz von 20-150ms auf. In der SII-Region waren von 60-120ms Quellenaktivitäten nachweisbar, wobei zuerst Signale im kontralateralen und anschließend im ipsilateralen SII-Kortex auftraten. Außerdem zeigte sich eine bilaterale Aktivierung des posterioren parietalen Kortex (60-140ms) und der frontalen Hirnregion (70-190ms). Am aktivsten waren hinsichtlich der maximalen Dipolstärke die SI- und SII-Region (Mauguière et al. 1997a).

Die P300-Komponente tritt auf, wenn eine Erwartung nicht erfüllt wird und symbolisiert daher die Löschung eines Kurzzeitgedächtnisinhaltes. Die Amplitude der P300 ist umso größer, je überraschender ein erwarteter Reiz nicht eintritt.

Ab 200-300ms sind mittels spezieller EEG-Techniken langsame Hirnpotentiale registrierbar, welche durch Biofeedback willentlich beeinflusst werden können (Birbaumer und Schmidt 2006).

Die evozierten Hirnpotentiale und –felder können durch die Reizeigenschaften, die aktivierten Leitungsbahnen und durch deszendierende Hemmung beeinflusst werden (Stöhr 1996).

Außerdem haben das Interstimulusintervall, die Stimulusrate und die Stimulusintensität Einfluss auf somatosensorisch evozierte Potentiale bzw. Felder (Desmedt et al. 1983, Forss et al. 1995, Iguchi et al. 2002, Mima et al. 1998).

1.5.1 Einfluss der Aufmerksamkeit auf die Ereigniskorrelierten Potentiale des somatosensorischen Kortex

Somatosensorisch evozierte Potentiale (SEPs) und Felder (SEFs) ermöglichen einen Informationsgewinn über die räumliche und zeitliche Signalverarbeitung im somatosensorischen Kortex.

Dass Aufmerksamkeit ereigniskorrelierte Potentiale des sekundären somatosensorischen Kortex beeinflusst, wurde in mehreren Studien bewiesen (Backes et al. 2000, Desmedt und Robertson 1977, Eimer und Forster 2003, Fujiwara et al. 2002, Hämäläinen et al. 2000, Hamada et al. 2003, Hoechstetter et al. 2000, Hötting et al. 2003, Hsiao et al. 1993, Johansen-Berg et al. 2000, Mima et al. 1998, Nelson et al. 2004, Sterr et al. 2007). Umstritten ist aber, ob und wie die Aufmerksamkeit SI beeinflusst. Bartenbach (2004), Eimer und Forster (2003), Garcia-Larrea et al. (1991), Hötting et al. (2003), Hsiao et al. (1993), Hyvärinen et al. (1980), Iguchi et al. (2002), Johansen-Berg et al. (2000), Lam et al. (2001), Meyer et al. (1991), Nelson et al. (2004) und Sterr et al. (2007) gehen von einer erhöhten Neuronenaktivität in SI unter Aufmerksamkeitszuwendung aus. Dabei konnten Bartenbach (2004), Eimer und Forster (2003) und Hötting et al. (2003) eine Signalintensitätssteigerung unter Aufmerksamkeitszuwendung erst bei Stimuluskomponenten ab 75ms feststellen. Sie fanden keinen Einfluss der Aufmerksamkeit auf die frühe M45-Komponente im somatosensorischen Kortex. Ebenfalls zeigte die fMRI-Studie von Hämäläinen et al. (2000) tendenziell größere Signale unter Aufmerksamkeitszuwendung in SI. Allerdings konnte in den fMRI Studien von Hämäläinen et al. (2000) und Johansen-Berg et al. (2000) sowie den Affenstudien von Hsiao et al. (1993) und Hyvärinen et al. (1980) keine Aussage über den Zeitpunkt der gesteigerten Signalaktivität in SI gemacht werden. Die EEG-Studie von Garcia-Larrea et al. (1991) und die MEG-Studie von Lam et al. (2001) ergaben bei Aufmerksamkeitszuwendung eine

signifikante höhere Signalintensität um 45ms. Hingegen berichteten Huonker et al. (2005), Karlowsky (1999), Mauguière et al. (1997b) und Thomann (2004) von einer verminderten Aktivität in SI bei einer Aufmerksamkeitsbedingung. Mauguière et al. (1997b) fanden allerdings keine signifikante Signalabnahme bei Aufmerksamkeitszuwendung auf taktile Reize. Die Verminderung der Signalintensität im primären somatosensorischen Kortex bei Aufmerksamkeitsausrichtung auf taktile Reize könnte durch den Effekt einer lateralen Inhibition Zustände gekommen sein (Huonker et al. 2005, Karlowsky 1999).

Keine Aktivitätsänderung in SI durch Aufmerksamkeit postulieren Backes et al. (2000), Fujiwara et al. (2002), Hamada et al. (2003), Hoechstetter (2000) und Mima et al. (1998). Diese unterschiedlichen Ergebnisse können durch die verschiedenen Messmethoden, Stimulusarten und Paradigmen verursacht werden.

Als Methoden zur Untersuchung des primären und sekundären somatosensorischen Kortex nutzten Braun et al. (2000), Desmedt et al. (1983) und Garcia-Larrea et al. (1991) die Elektroenzephalographie, Bartenbach (2004), Forss et al. (1995), Hoechstetter et al. (2000), Iguchi et al. (2005), Karlowsky (1999), Lam et al. (2001), Mauguière et al. (1997a), Mauguière et al. (1997b), Mima et al. (1998), Thomann (2004) die Magnetoenzephalographie, Meyer et al. (1991) die Positronenemissionstomographie und Hämäläinen et al. (2000) sowie Johansen-Berg et al. (2000) die Magnetresonanztomografie.

Eine elektrische Stimulation, welche in den Studien von Bartenbach (2004), Fujiwara et al. (2002), Garcia-Larrea et al. (1991), Lam et al. (2001) und Mauguière et al. (1997b) genutzt wurde, kann große Potentiale hervorrufen. Allerdings ist eine elektrische Stimulation für die Versuchsteilnehmer meistens unangenehmer und unnatürlicher als eine taktile Reizung mittels beispielsweise eines Airpuff-Stimulators, welcher in der Studie von Karlowsky (1999) und Thomann (2004) genutzt wurde. Das Airpuff-System braucht aber etwa 20-30ms um einen ausreichenden Druck aufzubauen, so dass es schwierig ist, den exakten Stimulusonset festzulegen und die M20 zu erkennen (Rossini et al. 1996). Mima et al. (1998) zeigten, dass mit steigender Stimulusintensität die Stärke der somatosensorisch evozierten Potentiale zunimmt. Allerdings beobachtete man in der Studie von Iguchi et al. (2002) einen geringeren Effekt der Aufmerksamkeit auf die M50-Komponente bei einer erhöhten Stimulusintensität. Desmedt et al. (1983) und Mima et al. (1998) machten mit ihren Experimenten deutlich, dass eine Aufmerksamkeitsausrichtung auf seltene Signale größere evozierte Potentiale hervorruft. Forss et al. (1995) fanden bei längeren Interstimulusintervallen eine Zunahme der Signalstärke. Auch spielt das Studienparadigma eine entscheidende Rolle. Aus dem Review von Johansen-Berg et al. (2000) und der PET-Studie von Meyer et al. (1991) wurde

ersichtlich, dass stärkere evozierte Signale unter Aufmerksamkeitszuwendung auf somatosensorische Reize zu registrieren waren, wenn die Aufmerksamkeitsbedingung mit einer Aufmerksamkeitsablenkungsbedingung verglichen wurde, als wenn eine Neutralbedingung ohne Aufmerksamkeitserfordernisse genutzt wurde.

Zusammenfassend kann man davon ausgehen, dass Aufmerksamkeit einen Einfluss auf Potentiale des sekundären somatosensorischen Kortex hat. Ob die Aufmerksamkeit die Signalverarbeitung im primären somatosensorischen Kortex beeinflusst, bleibt durch die unterschiedlichen und teilweise widersprüchlichen Studienergebnisse offen. Diese verschiedenen Studienergebnisse können wie beschrieben durch die unterschiedlichen Stimulationsarten, Paradigmen oder Messmethoden zustande kommen. Es bleibt weiterhin zu untersuchen, ob die laterale Inhibition eine Rolle im somatosensorischen Kortex spielt.

2 Ziele, Fragestellungen und Hypothesen

Das Ziel der Arbeit liegt darin, mehr Kenntnisse über die Informationsverarbeitung im primären somatosensorischen Kortex sowie die mögliche Beeinflussung dieser Verarbeitung durch Aufmerksamkeit zu gewinnen. Fraglich ist, ob die Ergebnisse der Studie von Karlowsky (1999) und Thomann (2004) repliziert werden können und bei Aufmerksamkeitsablenkung eine signifikant größere Dipol- bzw. Feldstärke als bei Aufmerksamkeitszuwendung auf die taktilen Stimuli nachweisbar ist. Außerdem soll untersucht werden, inwiefern sich die Dipol- bzw. Feldstärke ändert, wenn nah benachbarte Orte im Gegensatz zu voneinander weiter entfernten Orten taktil gereizt werden. Thomann (2004) konnte keine Verringerung der Dipolstärke bei der Stimulation benachbarter Finger (Zeige- und Mittelfinger) im Vergleich zu weiter entfernt liegenden Fingern (Zeige- und kleiner Finger) im Sinne einer lateralen Inhibition nachweisen.

Mit der vorliegenden Studie soll untersucht werden, ob und inwiefern Aufmerksamkeit die Signalverarbeitung im primären somatosensorischen Kortex beeinflusst. Dabei können die Stimulationsart, die Paradigmen und die Messmethode einen Einfluss auf die Signale im primären somatosensorischen Kortex nehmen. Ob die laterale Inhibition eine Rolle bei der Signalverarbeitung im primären somatosensorischen Kortex spielt, soll durch Reizung benachbarter Fingerareale an einem Finger (Reizung von Zeigefingerspitze und –grund) im Vergleich zur Reizung weiter entfernt liegender Fingerareale (Zeige- und kleiner Finger) untersucht werden.

Daher ergeben sich folgende Fragestellungen:

- I. Ist das Signal im primären somatosensorischen Kortex bei der Aufmerksamkeit auf dicht benachbarte Areale stärker oder schwächer als bei der Aufmerksamkeit auf taktile Reize weiter entfernt liegender Areale?
- II. Zeigt das Signal im primären somatosensorischen Kortex bei der Aufmerksamkeit auf visuelle Reize (Ablenkungsbedingung) im Gegensatz zur Aufmerksamkeit auf taktile Reize Unterschiede?

Geht man von der Theorie der lateralen Hemmung aus, so sollte bei der Aufmerksamkeit auf die taktile Stimulation benachbarter Areale ein schwächeres Signal auftreten. Je mehr

Aufmerksamkeit auf die taktilen Reize zur Aufgabenlösung notwendig ist, desto schwächer sind die evozierten Felder des primären somatosensorischen Kortex. Folglich wären die stärksten Signale bei Aufmerksamkeitsablenkung zu erwarten.

Daraus lassen sich folgende Hypothesen ableiten:

- I. Bei der Aufmerksamkeit auf taktil gereizte benachbarte Areale ist das Signal im primären somatosensorischen Kortex geringer als bei der Aufmerksamkeit auf entfernter liegende Areale.
- II. Bei der selektiven Aufmerksamkeit auf visuelle Reize entstehen im primären somatosensorischen Kortex stärkere Signale als bei der Aufmerksamkeit auf taktile Stimuli.

3 Methodik

3.1 Stichprobe

An dem Versuch nahmen zehn Studentinnen im Alter von 20 bis 28 Jahren (Mittelwert: 22,45 Jahre, Median: 22 Jahre) teil. Alle waren Rechtshänder und hatten keine neurologischen Defizite. Die Versuchsteilnehmer wurden für zwei Messungen, die jeweils etwa drei Stunden dauerte, mit maximal 30 Euro vergütet. Je mehr Fehler eine Probandin machte, desto weniger Geld erhielt sie. Damit wurde ein Anreiz gesetzt, sich möglichst gut zu konzentrieren.

Pro Messdurchführung wurden der Versuchsteilnehmerin nacheinander drei Aufgaben (Aufgabe A, B und C) gestellt. Bei der zweiten Messung an einem anderen Tag sollte die Probandin dieselben Aufgaben nur in umgekehrter Reihenfolge (Aufgabe C, B, A) lösen. Die Versuchsgruppe wurde in zwei Untergruppen geteilt. Fünf Probandinnen lösten am ersten Tag die Aufgaben in der Reihenfolge A-B-C und am zweiten Tag in der Reihenfolge C-B-A. Hingegen konzentrierten sich die anderen fünf Studentinnen bei der ersten Messung auf C-B-A und am zweiten Messtag auf A-B-C.

3.2 Stimulation und Paradigma

Jede Probandin musste sich je nach Aufgabenstellung entweder auf mechanische oder auf visuelle Reize konzentrieren. Die Stimulation erfolgte mit Hilfe eines taktilen Reizgebers an der rechten Hand und mit einer Leuchtdiode.

Wie bereits erwähnt, musste sich die Studentin nacheinander auf drei verschiedene Aufgaben konzentrieren.

Bei der Bedingung A wurden die Zeigefingerspitze und der Zeigefingergrund abwechselnd taktil stimuliert. Wurde derselbe Zeigefingerort nacheinander gereizt, so galt dies als ein Target und die Probandin sollte ein Bällchen mit der linken Hand drücken.

In der Bedingung B wurde die Versuchsperson angewiesen, ausschließlich auf die Leuchtdiode zu achten, die ihre Farbe zwischen rot, gelb und grün wechselte. Gelb galt dabei immer als Grundfarbe der Diode, so dass beispielsweise ein Wechsel zwischen der Farbe rot und rot mit einem gelben Zwischenschritt erfolgte. Leuchtete nacheinander dieselbe Farbe

(rot-[gelb]-rot oder grün-[gelb]-grün) auf, so sollte wieder das Bällchen gedrückt werden. Nebenbei wurden sowohl die Zeigefingerspitze- als auch der Zeigefingergrund taktil gereizt. Bei der Aufgabe C sollten die Studentinnen sich auf taktile Stimuli an der Zeigefingerspitze sowie an der Kleinfingerspitze konzentrieren. Wurde derselbe Ort nacheinander stimuliert, so sollte wiederum das Bällchen gedrückt werden.

Während die Versuchsteilnehmerinnen sich bei Aufgabe A und C auf taktile Stimuli konzentrieren sollten, wechselten die Leuchtdioden ihre Farbe wie bei Aufgabe B beschrieben.

Die Probandinnen wurden bei allen Aufgaben gebeten, sich nicht zu bewegen, möglichst wenig zu zwinkern und ihren Blick stets auf die Leuchtdiode zu richten, um Artefakte zu minimieren.

Alle Bedingungen lassen sich kurz zusammenfassen:

Bedingung A: selektive Aufmerksamkeit auf die Zeigefingerspitze und den Zeigefingergrund

Bedingung B: selektive Aufmerksamkeit auf die Leuchtdiode (bei gleichzeitiger taktiler Reizung der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes)

Bedingung C: selektive Aufmerksamkeit auf die Zeigefinger- und Kleinfingerspitze

3.3 Versuchsaufbau

Die MEG-Messungen der zehn Probandinnen wurden im Biomagnetischen Zentrum des Universitätsklinikums Jena durchgeführt.

Dazu war eine magnetisch abgeschirmte Kammer notwendig, weil ferromagnetische Gegenstände die Messung beeinträchtigt hätten.

Über den linken parietalen Kortex wurde ein Kryostat des Doppel-Dewar-Systems von Philips möglichst nahe justiert. Der Antennenarray-Durchmesser des Magnetometers (mit 31 Kanälen) betrug 14cm.

Fünf Lokalisationsspulen, die auf dem linken parietalen Schädel mit Hilfe von Elektrodenpaste positioniert wurden, dienten als funktionelle Landmarken.

Damit die Studentin, die auf der rechten Körperseite lag, sich möglichst wenig bewegte, wurden der Kopf und der Körper mit Hilfe eines Vakuumkissens fixiert. Die taktile bzw. mechanische Stimulation der Finger erfolgte durch Airpuffs (Somatosensory Stimulus Generator, Biomagnetic Technologies). Dabei wurden Fingerclips an die zu stimulierenden

Orte angelegt. Diese Clips enthalten eine Membran, die durch Druckluft vorgewölbt wird und daher einen mechanischen Reiz erzeugt.

Die visuelle Stimulation erfolgte durch eine Leuchtdiode, die innerhalb von etwa ein bis zwei Sekunden ihre Farbe zwischen rot, gelb und grün wechselte.

Wiederholte sich eine Stimulation, so sollte die Versuchsperson ein mit Luft gefülltes Bällchen drücken.

Außerdem wurden vier Elektroden über und unter dem linken Auge sowie lateral beider Augen angebracht, um ein Elektrookulogramm abzuleiten. Mittels der Elektrookulographie (EOG) werden Spannungsdifferenzen zwischen den Elektroden gemessen, die durch Augenbewegungen hervorgerufen werden. Dieses Elektrookulogramm war notwendig, damit bei der späteren Messauswertung Artefakte herausgefiltert werden konnten, die durch Augenbewegungen entstehen können.

Während der Messung wurde die Herzfrequenz der Probanden durch Elektrokardiogramm (EKG)-Elektroden und der Zustand der Probandinnen durch eine Videokamera überwacht.

3.4 Versuchsablauf

Vor dem Versuch wurden alle Probandinnen über den Versuch aufgeklärt und alle erklärten schriftlich ihr Einverständnis.

Um die gemessenen magnetischen Felder der Anatomie des Kortex anzupassen, wurde von jeder Studentin ein MRT-Bild angefertigt. Diese MRT-Messung wurde durch das Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie der FSU Jena ermöglicht. Zur Aufnahme wurde ein Siemens Magnetom Vision 1,5 T Gerät genutzt.

Beim eigentlichen MEG-Untersuchungstermin wurde die Studentin gebeten, alle ferromagnetischen Sachen abzulegen. Anschließend wurde Cz als Schnittpunkt der Verbindungslinie zwischen Nasion und Inion und der Linie zwischen dem linken und rechten präaurikulären Punkt ausgemessen und markiert. Der Nasion-Inion-Abstand sowie die Entfernung vom rechten zum linken Ohr wurden protokolliert, um später die Cz-Lage im MR-Bild rekonstruieren zu können. Nach der Reinigung der entsprechenden Hautstellen wurden die EOG- und EKG-Elektroden angebracht. Fünf Lokalisationsspulen wurden auf einer handtellergroßen Fläche über dem linken parietalen Schädel positioniert. Die Spulen wurden durch EEG-Paste (Ten 20 Conductive von D.O Weaver and Co.), einem hochelastischen Netzschlauchverband (von Lohmann & Rauscher International GmbH & Co.) und

Klebestreifen fixiert. Mit Hilfe des ISOTRAK II Digitalisierer (Polhemus Inc., USA) konnten die anatomischen Landmarken (rechter und linker präauriculärer Punkt, Nasion, Cz) sowie die funktionellen Landmarken (fünf Lokalisationsspulen) ausgemessen und digitalisiert werden. Nun wurden die Probanden gebeten, sich auf die Liege in der MEG-Kammer zu legen. Dabei sollten sie sich möglichst bequem auf die rechte Körperseite legen und ihren rechten Arm antevertieren. Der Kryostat wurde so nah wie möglich über den fünf Lokalisationsspulen des linken Schädels positioniert. Um Bewegungen der Versuchsperson zu vermeiden, wurde die Kopf- und Körperhaltung durch ein Vakuumkissen unterstützt. Nach dem Anlegen zweier Erdungen an den rechten Arm wurde am Handgelenk mit zwei Stromelektroden der Medianusnerv aufgesucht. Die Medianusreizung erfolgte mit dem Digitimer, Constant Current Stimulator Modell DS7A. Im nächsten Schritt wurde die sensible und motorische Reizschwelle des Nervs bestimmt. Durch die Addition beider Reizschwellen wurde die Stärke der elektrischen Medianusstimulation festgelegt. Folglich erzeugte die Reizintensität eine Daumenbewegung von 1 bis 2 cm (Nuwer et al. 1994).

Die Position des Kryostaten musste durch eine Probemessung überprüft werden, damit der Kryostat optimal über dem parietalen Schädel eingestellt werden konnte. Bei dieser Probepositionierung wurde der Medianus 64mal gereizt. Lagen Minimum und Maximum des gemessenen Feldes nicht zu etwa gleichen Anteilen im Betrachtungsfenster, so musste die Lage des Kryostaten verändert und eine erneute Probemessung vorgenommen werden. Vor und nach jeder Messung mussten die Spulen als funktionelle Landmarken lokalisiert werden. Nach dem erfolgreichen Abschluss der Probepositionierung konnte mit der eigentlichen Medianusmessung begonnen werden. Dazu wurde der Medianusnerv 512mal elektrisch stimuliert. Das dabei entstandene evozierte Feld wird ebenfalls als funktionelle Landmarke verwendet. Der Probandin wurde nun die erste Aufgabe erklärt. Mit Hilfe des Computerprogramms "Presentation" wurden die taktilen und visuellen Reize in einer randomisierten Reihenfolge dargeboten. Nach einer kurzen Übungsphase sowie der Lokalisation der Spulen konnte die Messung begonnen werden. Im "Presentation"-Programm des Steuerrechners wurde die Stimulanzahl, die durch Probanden verursachte Fehleranzahl, die Fehlerrate in Prozent sowie die Reaktionszeit gespeichert. Nach Abschluss der drei Aufgaben und den dazugehörigen Spulenlokalisationen wurden die anatomischen und funktionellen Landmarken nochmals mit dem ISOTRAK Digitalisierer in dreidimensionale Koordinaten transferiert. Die nachfolgende Tabelle 1 soll eine Übersicht über den Versuchsablauf geben.

Tabelle 1: Übersicht über den Versuchsablauf

	Tag 1	Tag 2
Anatomische und funktionelle Landmarken	3D-Digitalisierung	
Probepositionierung	Probemessung mit 64facher Medianusreizung	
Medianuslokalisation	Funktionelle Spulenlokalisation	
	Messung mit 512facher Medianusreizung	
	Funktionelle Spulenlokalisation	
1. Aufgabe	Funktionelle Spulenlokalisation	
	Messung während Bedingung A	Messung während Bedingung C
	Funktionelle Spulenlokalisation	
2. Aufgabe	Funktionelle Spulenlokalisation	
	Messung während Bedingung B	Messung während Bedingung B
	Funktionelle Spulenlokalisation	
3. Aufgabe	Funktionelle Spulenlokalisation	
	Messung während Bedingung C	Messung während Bedingung A
	Funktionelle Spulenlokalisation	
Anatomische und funktionelle Landmarken	3D-Digitalisierung	

Tab. 1: Diese Übersicht über den Versuchsablauf (A: Aufmerksamkeit auf die Zeigefingerspitze und den Zeigefingergrund, B: Aufmerksamkeitsablenkung durch die Leuchtdioden unter Stimulation der Zeigefingerareale, C: Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Zeige- und Kleinfingerspitze) gilt für die erste Gruppe mit fünf Probanden. Die restlichen 5 Probanden begannen mit dem Versuchsablauf vom Tag 2 am 1.Tag und der Versuchsablauf vom Tag 1 galt am 2.Tag.

3.5 Datenauswertung

Folgende Dateien standen zum Untersuchungsende zur Verfügung:

MRT:	ISO-Datensatz: T1-Aufnahme des Schädels
Schriftliches Protokoll:	Angaben zur Versuchsperson und zum verwendeten Paradigma, Besonderheiten bei der Messdurchführung, Bezeichnung der Dateien
Protokoll-File des Steuerrechners:	dargebotene Trials, erfolgte Reaktionen, Fehler, Reaktionszeiten
Digitizer-File:	anatomische Landmarken-Koordinaten
Lokalisations-File:	funktionelle Lokalisation der Spulenkoordinaten
Messdaten-File:	MEG-Kanäle, EOG, Triggerinformationen

Die Daten konnten durch die Computerprogramme Curry 2 und Curry 4.6 ausgewertet werden.

Aus dem T1-gewichteten MRT-Bild war es möglich, den Kortex, die Schädelinnenfläche (CSF, geltend als Cerebrospinalflüssigkeit) sowie die Hautoberfläche zu rekonstruieren. Dazu waren unterschiedliche Parameter für die Segmentierung, Dilatation und Erosion notwendig.

Segmentierung

Die Segmentierung dient dem automatischen Aufsuchen von Grenzflächen unterschiedlicher Gewebsarten in den Bildern. Das Schwellenwert-Verfahren, bei dem Pixel eines Grauwertbereiches zu einer Region zusammengefasst werden, ist eine der einfachsten Segmentierungsmethoden. Durch Abbildungsfehler oder starkes Rauschen können bei diesem Verfahren allerdings häufig falsch segmentierte Areale entstehen.

Das Regionen-Wachstum-Verfahren stellt eine weitere Segmentierungsmethode dar, bei dem von einem oft per Hand gesetzten „Saatpunkt“ aus die Grauwerte der Nachbarpixel überprüft werden und diese Pixel zum Gebiet hinzugefügt werden, falls sie den Schwellenwert des vorgegebenen maximalen Grauwertes nicht überschreiten. Bei Rauschen und Artefakten kann die Segmentierungsregion in Randgebieten, wo bestimmte Pixel einen zu niedrigen Grauwert haben, „auslaufen“. Oft werden die Bilder vorher durch einen Gaußfilter geglättet und somit ein Rauschen unterdrückt (Dössel 2000).

Im Magnetresonanz-Hautoberflächenbild wurden Nasion sowie der linke und rechte präaurikuläre Punkt markiert. Cz wurde durch den protokollierten Abstand vom Nasion rekonstruiert und eingezeichnet.

Durch die Triggerkodierung konnten die MEG-Daten für die entsprechenden Fingerorte (Zeigefingerspitze, Zeigefingergrund und Kleinfingerspitze) aufgetrennt werden (Template Matching). Außerdem erfolgte eine Artefaktunterdrückung für die Augenbewegung im Bereich von $\pm 150\mu\text{V}$ sowie für das Bällchen-drücken im Bereich von $\pm 3000\mu\text{V}$, damit die Enddaten weder durch Augen- noch durch Antwortbewegungen verfälscht werden. Eine Mittelung (Average) wurde für die restlichen Trials durchgeführt. Anschließend erfolgte die Filterung der Daten. Sie wurden mit Hilfe des Wiener Filters (Daubechies 12) und des Fourier-Filters (Butterworth 3.Ordnung) gefiltert. Dabei erfolgte die Fourier-Filterung der Medianus-Daten mit einer Bandbreite von 0,3 - 250Hz und die Signale bei taktilem Stimulation mit dem Airpuff-System mit einer Bandbreite von 0,3 - 150Hz. Bei allen Daten wurde eine Common-Mode-Rejection (CMR) der 0.Ordnung durchgeführt, um Störsignale zu unterdrücken. Außerdem erfolgte eine Baseline-Korrektur im Bereich von -100 bis -4ms. Die Werte für das Rauschen und das Signal-Rausch-Verhältnis wurden im Protokoll vermerkt.

Anschließend erfolgte eine Berechnung der Dipolstärke, um die evozierten Felder der Aufmerksamkeits- und Ablenkungsbedingung miteinander vergleichen zu können. Dazu wurde die Kugel als Volumenleitermodell verwendet, weil in mehreren Studien das Kugelmodell für Untersuchungen des somatosensorischen Kortex als ausreichend befunden wurde (Ducla-Soares 1990). Folglich wurde eine Kugel an die vorverarbeiteten MRT-Bilder der Probanden angepasst. Letztendlich erfolgte eine Dipollokalisierung mit dem Modell des Moving-Dipol, so dass der Dipol im Laufe der Zeit Ort, Richtung und Stärke variieren konnte. Der beste Dipolfit wurde in die nachfolgende Auswertung einbezogen. Dabei galten folgende Kriterien:

1. Der Dipol muss anatomisch sinnvoll lokalisiert sein. Er sollte im Bereich des Gyrus postcentralis liegen.
2. Die maximale Dipolstärke sollte in einem Zeitraum von 39ms bis 68ms liegen.
3. Die Abweichung (Deviation) sollte möglichst gering sein
4. Die maximale MGFP sollte im Zeitraum von 39ms bis 68ms liegen.

Zuerst wurde im Zeitbereich von 15 bis 150ms nach den maximalen Werten für die MGFP gesucht. Gab es mehrere Maxima, so wurde die anatomisch sinnvollste Dipollokalisierung ausgewählt. Dabei wurde die Dipollokalisierung mit den Dipolkoordinaten bei

Medianusreizung verglichen und der Dipol in der Nähe der Medianusrepräsentation als sinnvoll erachtet.

Um sich das Koordinatensystem vorstellen zu können, soll der Aufbau kurz dargestellt werden: Die positive x-Achse schneidet den linken präaurikulären Punkt, die positive y-Achse verläuft durch das Nasion, die z-Achse beginnt im Schnittpunkt der x- und y-Achse und verläuft senkrecht in Richtung der Schädeloberfläche. Der Nullpunkt ist der Schnittpunkt aller drei Achsen und liegt daher im Kopf.

Die Daten für den besten Dipolfit wurden in eine Excel-Tabelle übertragen. In die weitere Auswertung werden die Dipolstärke, die MGFP-Werte, das Hintergrundrauschen und die Dipolkoordinaten mit einbezogen. Der Vorgang der Dipollokalisierung soll mit Hilfe der nachfolgenden Abbildungen (Abb. 12 und 13) veranschaulicht werden.

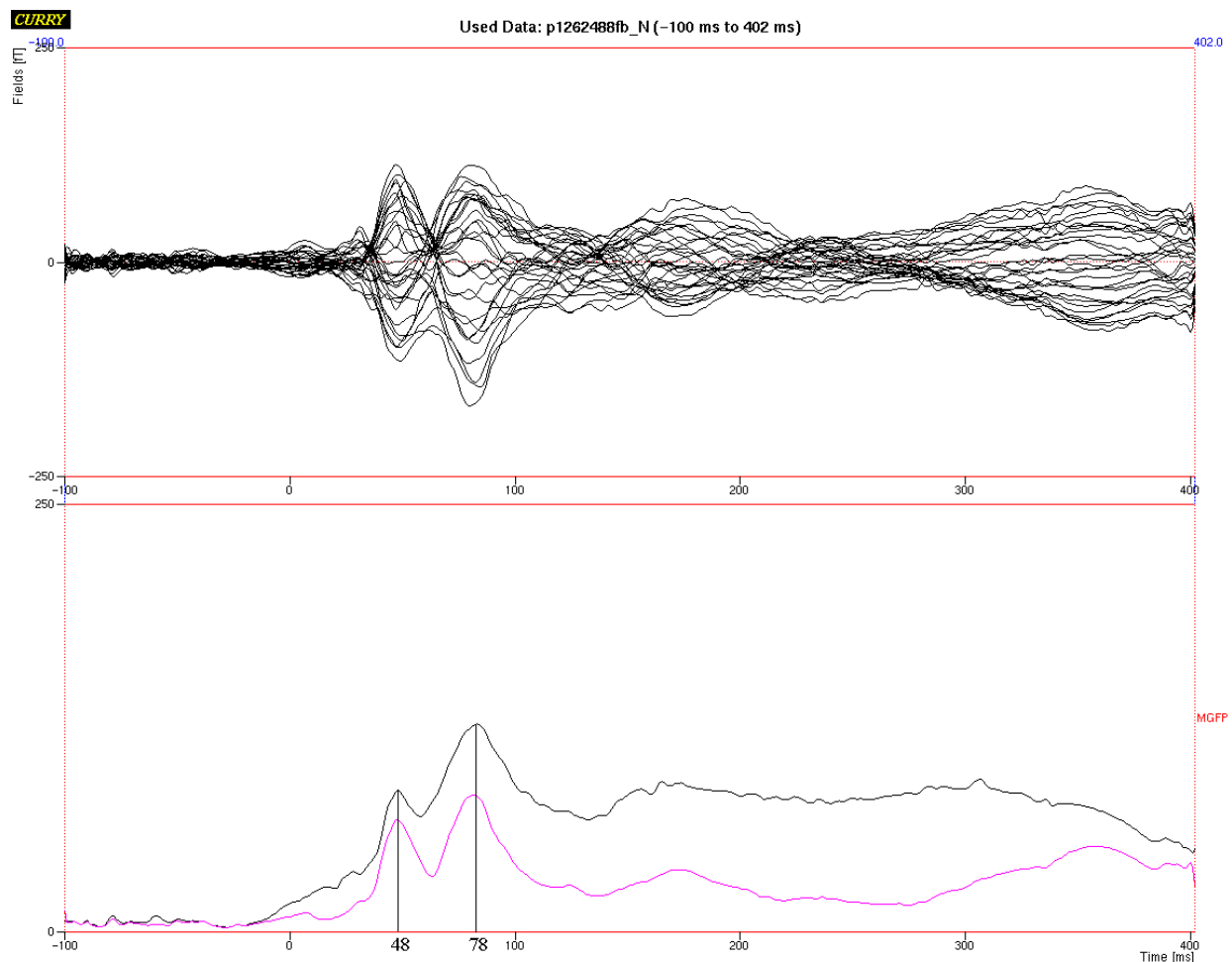


Abb. 12: In der oberen Abbildung ist der Zeitverlauf der somatosensorisch evozierten Felder dargestellt. Der Verlauf der Mean Global Field Power (MGFP [fT]): schwarz: ungefiltert; rot: gefiltert) ist in der unteren Abbildung erkennbar. Die Maxima der MGFP liegen bei 48 und 78ms (Programm: Curry 4.6).

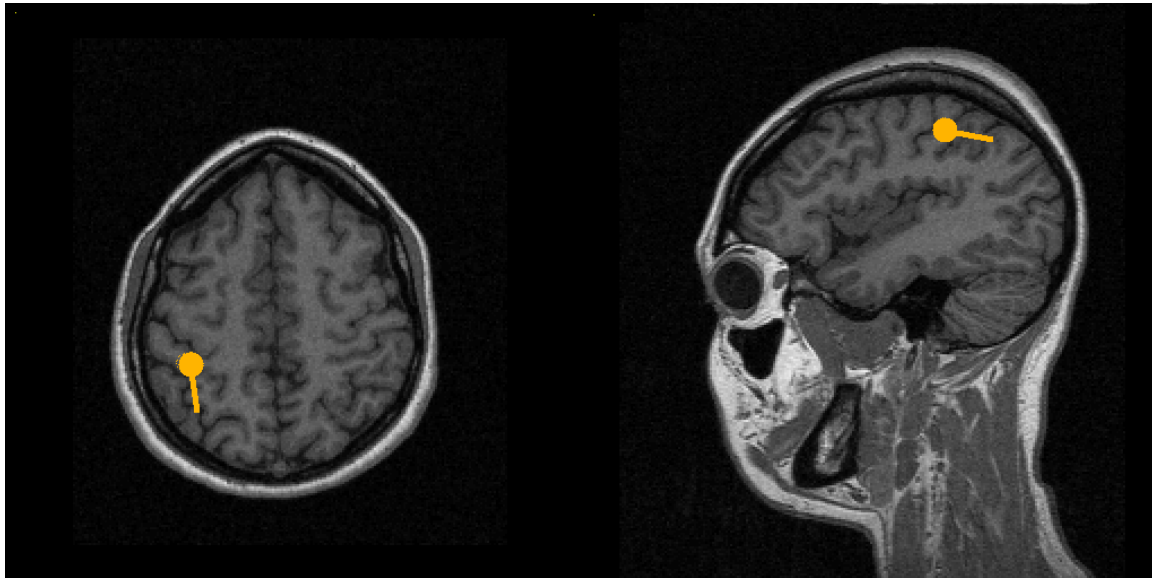


Abb. 13: Beispielhafte Darstellung der Dipollokalisierung der M48 (48ms nach Stimulus-Onset) nach taktiler Stimulation des Zeigefingers, wobei die Quelle im primären somatosensiblen Kortex (SI) im Handareal des Gyrus postcentralis (Brodmann-Area 3b) liegt (Programm: Curry 4.6).

Im dargestellten Beispiel liegt der Dipolfit bei 48ms in der Area 3b nach Brodmann (vgl. Abb.13). Hingegen lokalisiert der Dipol bei 78ms nicht in der Area 3b. Folglich spiegelt nur der Dipolfit von 48ms die Daten des gesuchten Dipols wider.

3.6 Messfehler

Viele Messungenauigkeiten sind vermutlich durch Bewegungsartefakte entstanden, da es den Probandinnen sehr schwer gefallen ist, über 90 Minuten still auf der rechten Körperseite liegen zu bleiben. Kopfbewegungen konnten durch den Vergleich der Spulenlokalisierung vor und nach jeder Messung registriert werden. Außerdem wurde eine Artefaktunterdrückung für die Bewegung der Augen und für das Drücken des pneumatischen Bällchens durchgeführt.

3.7 Statistische Analyse

Für den Vergleich der MGFP, der Dipolstärke, des Hintergrundrauschens und der x-, y-, z-Komponente der drei Bedingungen wurde eine statistische Auswertung mit dem Statistikprogramm SPSS 14.0 durchgeführt. Dabei wurde die Methode des Allgemeinen Linearen Modells (ALM bzw. GLM) mit Messwiederholungen gewählt, da mehrere Messungen pro Proband durchgeführt wurden (Bühl 2006).

Versuchspläne mit Messwiederholungen haben den Vorteil, dass über die Faktorstufen hinweg Ausprägungen der a-priori-Unterschiede beziehungsweise Personeneffekte der Probanden konstant bleiben. So werden unerklärbare Varianzen verringert. Allerdings entstehen durch die Messwiederholung auch andere Störgrößen, so dass beispielsweise Übungseffekte, Erinnerungseffekte oder Transfereffekte auftreten können (Moosbrugger 1994).

Voraussetzung für die Varianzanalyse sind normalverteilte Daten. Ob die Daten eine Normalverteilung aufweisen, konnte mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test überprüft werden. Dabei konnte sowohl für die erhobenen Dipolstärke-Werte als auch für die MGFP-Werte eine Normalverteilung nachgewiesen werden.

Außerdem müssen Korrelationen zwischen Faktorstufen und Varianzen unter einzelnen Faktorstufen homogen sein. Werden nur zwei Messzeitpunkte untersucht, so ist keine homogene Korrelation notwendig (Bortz 2005).

Der Mauchly-Test auf Sphärizität prüft, ob die Voraussetzungen für den Test erfüllt sind. Gibt es Verletzungen der Voraussetzungen, so findet eine Kompensation durch Epsilon-korrigierte Freiheitsgrade statt. Das Epsilon nach Greenhouse-Geisser ist konservativer als das Huynht-Feldt-Epsilon. Wenn das Greenhouse-Geisser-Epsilon größer als 0,75 ist, so ist keine Korrektur notwendig.

Die Besonderheit des ALM liegt in der Integration von Methoden der Varianz-, Korrelations- und Regressionsanalyse.

Es muss das Verfahren einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse angewandt werden, weil sowohl der Tag mit zwei Abstufungen (Tag 1 und 2) als auch die Bedingungen mit drei Stufen (Aufgabe A, B und C) Einflussfaktoren auf die Messergebnisse darstellen können. Die Probandengruppe wurde in zwei Untergruppen geteilt, wobei jeder Untergruppe eine unterschiedliche Reihenfolge der Aufgaben zugeordnet wurde. So musste die Gruppe 1 am 1.Tag erst Bedingung A und am 2.Tag als erstes Bedingung C lösen, während die Gruppe 2 am 1.Tag mit Aufgabe C begann und am 2. Tag mit Aufgabe A startete. Die Bedingung B sollte stets als zweite Aufgabe von den Probandinnen gelöst werden. Die verschiedenen Gruppen konnten als Zwischensubjektfaktor in der statistischen Analyse der Daten beachtet werden.

Es wurde jeweils eine mehrfaktorielle Varianzanalyse für jeden Parameter (MGFP, Dipolstärke, Rauschen, x-, y- und z-Komponente) mit dem dreifach gestuften Innersubjektfaktor Aufgabe, dem zweifach gestuften Innersubjektfaktor Messtag und dem

zweifach gestuften Zwischensubjektfaktor Bedingungsreihenfolge für die Zeigefingerspitze und den Zeigefingergrund getrennt durchgeführt. Ebenso wurden die Häufigkeiten objektiv richtiger Lösungen, die subjektive Einschätzung richtiger Lösungen und die subjektive Einschätzung der Aufgabenschwierigkeit mit Hilfe des Allgemeinen Linearen Modells untersucht. Durch Kontraste bzw. Einzelvergleiche kann man erkennen, welche Messbedingungen zu signifikanten Unterschieden der Messergebnisse geführt haben.

Nach der Varianzanalyse wurde ein T-Test für abhängige Stichproben durchgeführt, wenn das ALM signifikante Ergebnisse lieferte. Die Stichproben gelten als abhängige Stichproben, weil an einer Stichprobe zwei Messungen durchgeführt worden sind. Mit dem T-Test konnten die MGFP-Werte und die Dipolstärken der verschiedenen Bedingungen untereinander verglichen werden, so dass sich bei Signifikanz des T-Tests eine Aussage über das Größenverhältnis der Messergebnisse der verschiedenen Aufgaben treffen lässt. Für diese Analyse wurden die Mittelwerte der MGFP- und Dipolstärke-Werte jeder Probandin für die unterschiedlichen Bedingungen vom Tag 1 und Tag 2 gebildet. Eine Voraussetzung für den T-Test ist die Normalverteilung der Messwertdifferenzen, welche mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test nachgewiesen werden konnte. Zur Kontrolle erfolgte anschließend die Wiederholung des Allgemeinen Linearen Modells mit den Mittelwerten der Messergebnisse von Tag 1 und Tag 2. Mit Hilfe des T-Tests für abhängige Stichproben konnten auch Unterschiede zwischen den Messtagen bezüglich der objektiven Richtigkeit und der subjektiven Einschätzung der Richtigkeit und Aufgabenschwierigkeit überprüft werden.

Allgemein erfolgt die Analyse der Effekte auf einem 5%-Signifikanzniveau, so dass p-Werte kleiner 0,05 als signifikant (*), kleiner 0,01 als sehr signifikant (**) und kleiner 0,001 als äußerst signifikant (***) bezeichnet werden.

Zusammengefasst lässt sich die Hypothesentestung wie folgt erklären:

Die Hypothese I besagt, dass bei Reizung benachbarter Fingerareale ein kleineres Signal als bei Reizung weiter entfernt liegender Fingerareale ableitbar sei. Folglich wird bei dem Vergleich der Dipolstärken, MGFP-Werte und des Hintergrundrauschens der Bedingung A (Reizung an Zeigefingerspitze und –grund) ein signifikant kleineres Signal als bei der Bedingung C (Reizung von Zeigefinger- und Kleinfingerspitze) durch die Testung mit dem Allgemeinen Linearen Modell und dem T-Test erwartet. Daher wird für jeden Messparameter (Dipolstärke, MGFP-Werte und Hintergrundrauschen) der Zeigefingerspitze nach der Testung auf Normalverteilung mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test ein ALM mit Messwiederholung durchgeführt, wobei der Tag und die Bedingung Innersubjektfaktoren und die

Bedingungsreihenfolge als Zwischensubjektfaktor beachtet werden. Falls die Bedingung einen signifikanten Effekt auf die Messparameter hat und signifikante Unterschiede zwischen der Bedingung A und C nachweisbar sind, so wird ein T-Test für abhängige Stichproben durchgeführt, um eine Aussage über das Größenverhältnis zwischen den Bedingungen treffen zu können. Lassen sich dabei signifikant kleinere Signale bei Bedingung A im Vergleich zur Bedingung C erkennen, so kann die Hypothese I angenommen werden.

Weiterhin wird behauptet, dass bei Aufmerksamkeit auf visuelle Reize stärkere Signale im primären somatosensorischen Kortex entstehen als bei Aufmerksamkeitsausrichtung auf taktile Reize. Daher wird angenommen, dass beim Vergleich der MGFP-Werte, der Dipolstärken und des Hintergrundrauschens der Bedingung B (Aufmerksamkeit auf visuelle Reize während taktile Zeigefingerstimulation) ein signifikant größeres Signal als bei den Bedingungen A bzw. C (Aufmerksamkeit auf taktile Reize) mit dem Allgemeinen Linearen Modell und den T-Tests nachgewiesen werden kann. Für den Vergleich der Bedingung A gegen B werden sowohl die normalverteilten Messwerte für die Zeigefingerspitze als auch für den Zeigefingergrund untersucht, da beide Fingerareale in den Messbedingungen stimuliert werden. Daher werden sowohl die Messparameter für die Zeigefingerspitze als auch die Messergebnisse für den Zeigefingergrund mit dem Allgemeinen Linearen Modell mit Messwiederholungen untersucht. Ergibt sich ein signifikanter Einfluss der Bedingungen auf die Messparameter und sind signifikante Unterschiede zwischen den Bedingungen A und B bzw. zwischen den Bedingungen B und C nachweisbar, so folgt eine Untersuchung der Daten mit dem T-Test für abhängige Stichproben. Werden dabei signifikant größere Messparameter bei Bedingung B im Vergleich zur Bedingung A bzw. C nachgewiesen, so kann die Hypothese II angenommen werden.

Zur graphischen Darstellung wurde mit Hilfe des Programms Excel 2000 von Microsoft eine Normierung der Daten vorgenommen. Dabei wurde der Mittelwert aller Messwerte eines Probanden gebildet und jeder einzelne Messwert des Probanden durch diesen Mittelwert dividiert. Die Mittelwerte der normierten Messwerte der Bedingungen wurden in einem Säulendiagramm graphisch dargestellt (vgl. Abb. 22 bis 25).

4 Ergebnisse

Im Zeitbereich von 39ms bis 68ms konnte ein Hauptpeak der somatosensorisch evozierten Signale bei allen Probandinnen festgestellt werden, der in die Auswertung einbezogen wurde. Bei einigen Versuchspersonen waren außerdem Peaks vor 39ms und nach 68ms erkennbar. Diese Peaks sind in der folgenden Abbildung Nr. 14 beispielhaft veranschaulicht.

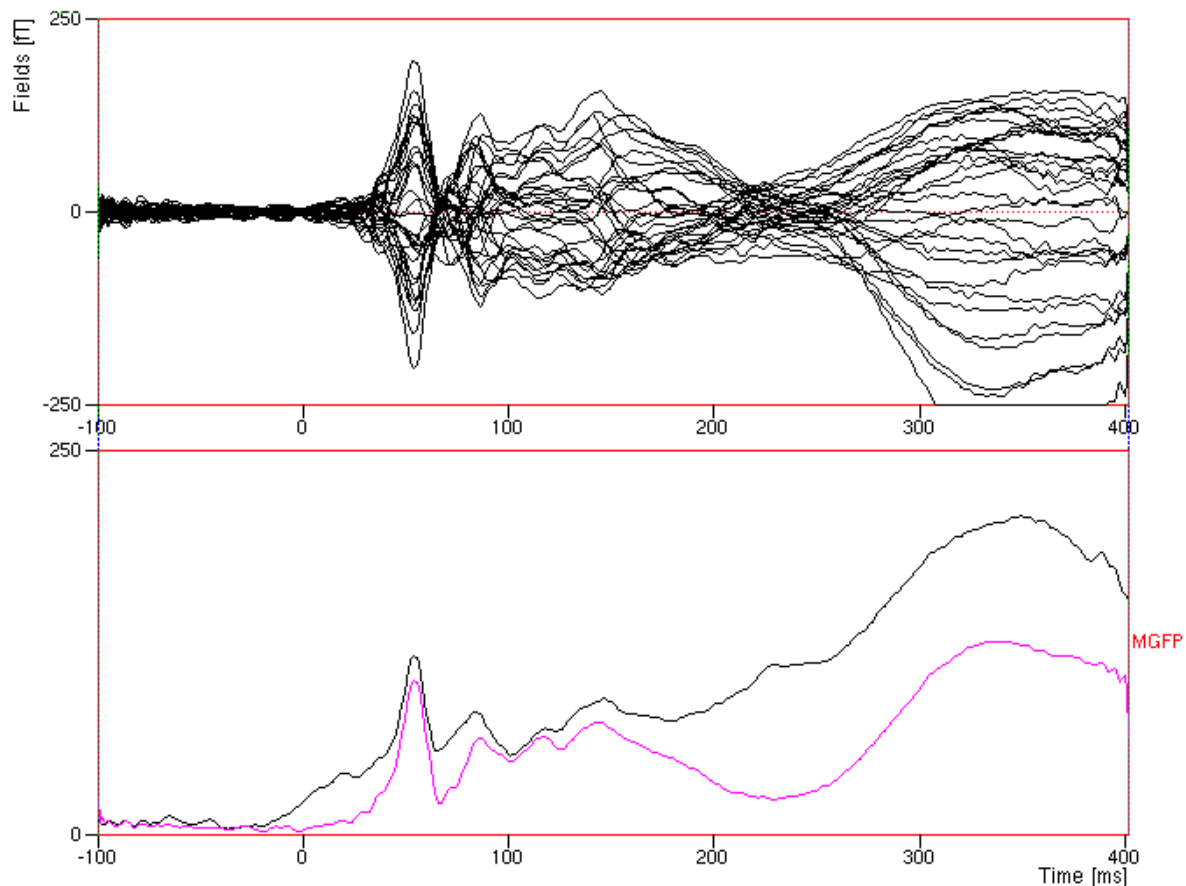


Abb. 14: In der oberen Abbildung sind mehrere Peaks der somatosensibel evozierten Felder dargestellt. Die untere Abbildung lässt den Zeitverlauf der MGFP [fT] erkennen (MGFP: schwarz: ungefiltert; rot: gefiltert) (Programm: Curry 4.6).

4.1 Quellenlokalisierung

Für den Hauptpeak wurde eine Quellenlokalisierung durchgeführt. Die Dipole konnten in der Brodmann Area 3b des Gyrus postcentralis lokalisiert werden. Das Ergebnis einer solchen Dipollokalisierung ist in Abbildung Nr. 15 zu sehen.

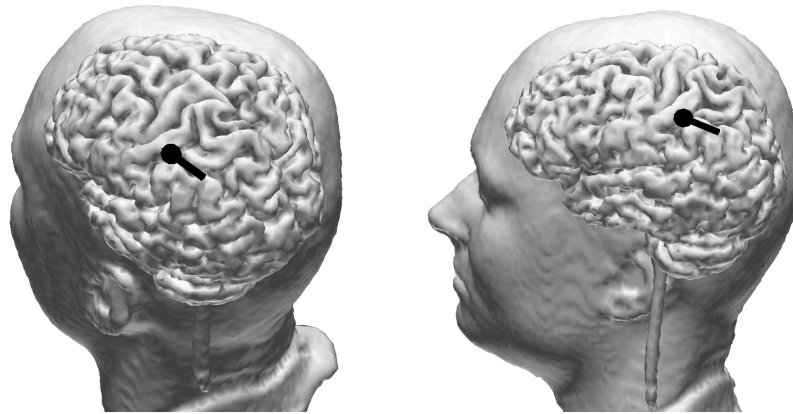


Abb. 15: Abgebildet sind die Haut, der Kortex und die Dipollokalisierung aus unterschiedlichen Perspektiven (Programm: Curry 4.6).

Für die Reizung der Zeigefingerspitze konnte der Dipol durchschnittlich an folgender Stelle im Koordinatensystem gefunden werden: $x=42,5\text{mm}$, $y=10,7\text{mm}$ und $z=66,1\text{mm}$. Der Dipol für den Zeigefingergrund zeigt im Durchschnitt folgende Koordinaten: $x=42,3\text{mm}$, $y=10,7\text{mm}$ und $z=67,2\text{mm}$. Beide Dipole liegen folglich räumlich nah beieinander.

Das Signal-Rauschverhältnis, welches auf die Rauschschätzung der Mittelungsstatistik bezogen ist, beträgt durchschnittlich für Signale der Zeigefingerspitze 10,4 und für die Signale des Zeigefingergrundes 9,7.

Der Restfehler, auch Deviation genannt, beträgt für den Dipolfit der Zeigefingerspitze $10,0 \pm 4,5 \%$ und für den Dipolfit des Zeigefingergrundes $9,4 \pm 4,4 \%$. Die Deviation entspricht der Abweichung zwischen gemessenem und errechnetem magnetischen Feld. Ein kleiner Restfehler beweist eine hohe Güte der Berechnung.

Die Dipolstärke beträgt für den Dipolfit der Zeigefingerspitze im Durchschnitt für die Bedingung „Aufmerksamkeitszuwendung auf Zeigefingerspitze und –grund“ (A) $23,5 \pm 10,6 \mu\text{Amm}$, für die Bedingung „Aufmerksamkeitszuwendung auf Lichtreize“ (B) $19,9 \pm 6,4 \mu\text{Amm}$ und für die Bedingung „Aufmerksamkeitszuwendung auf Zeigefinger- und Kleinfingerspitze“ (C) $24,3 \pm 7,8 \mu\text{Amm}$.

Der Zeigefingergrund weist eine durchschnittliche Dipolstärke des Dipolfits für Bedingung A $21,8 \pm 8,0 \mu\text{Amm}$ und für Bedingung B $21,3 \pm 7,1 \mu\text{Amm}$ auf.

Die Größe des magnetischen Feldes lässt sich anhand der MGFP abschätzen. Die MGFP beträgt für die Zeigefingerspitze bei Bedingung A durchschnittlich $453,5 \pm 169,1 \text{ fT}$, bei Bedingung B im Durchschnitt $441,7 \pm 144,3 \text{ fT}$ und bei Bedingung C durchschnittlich $512,2 \pm 159,4 \text{ fT}$.

Für den Zeigefingergrund beträgt die MGFP im Durchschnitt für Bedingung A $448,6 \pm 145,8 \text{ fT}$ und für Bedingung B $449,7 \pm 112,6 \text{ fT}$.

4.2 Objektive und subjektive Fehlerverteilung

Durchschnittlich wurden die meisten Fehler mit 4,2% in Bedingung A (Aufmerksamkeit auf den Zeigefinger) gemacht. Die Fehlerrate betrug für Bedingung B (Aufmerksamkeitszuwendung auf die Leuchtdioden während der Zeigefingerreizung) 2,8% und für Bedingung C (Aufmerksamkeit auf den Zeigefinger und kleinen Finger) 3,0%. Folglich wurden durchschnittlich mindestens 95% der Aufgaben richtig gelöst: die Bedingung A wurde mit $95,8 \pm 3,8 \%$, die Bedingung B wurde mit $97,2 \pm 2,8 \%$ und die Bedingung C wurde mit $97,0 \pm 2,4 \%$ richtig gelöst.

Eine Normalverteilung der Daten konnte mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test nachgewiesen werden. Bei der statistischen Analyse der Daten mit dem Allgemeinen Linearen Modell wurden als Innersubjektfaktoren der Untersuchungstag und die Messbedingung sowie als Zwischensubjektfaktor die Untersuchungsreihenfolge beachtet. Es konnten signifikante Unterschiede zwischen den Untersuchungstagen festgestellt werden ($p=0,033^*$, vgl. Tab. 2). Die Bedingungen nehmen nur einen tendenziellen Einfluss auf die Messparameter ($p=0,065$, vgl. Tab. 2).

Tabelle 2: Ergebnisse des Allgemeinen Linearen Modells bei Untersuchung der objektiv richtigen Lösungen

Quelle	Epsilon nach Greenhouse-Geisser	F-Wert	Signifikanzwert
Bedingung	0,500	3,607	0,065
Tag	1,000	6,646	0,033*
Bedingung * Tag	0,500	0,077	0,822
Bedingung * Gruppe		0,260	0,727

Daher wurden T-Tests für abhängige Stichproben durchgeführt, um die Messwerte der verschiedenen Untersuchungstage und die Bedingungen zu vergleichen. Zwischen den Messtagen konnten signifikante Unterschiede ($p=0,001^{**}$, vgl. Tab.3) gefunden werden. Anhand der Mittelwerte lässt sich feststellen, dass am zweiten Versuchstag objektiv mehr Aufgaben mit $97,6 \pm 2,1 \%$ richtig gelöst wurden als am ersten Versuchstag mit $95,8 \pm 3,6 \%$ objektiv richtigen Lösungen (vgl. Tab. 3, Abb. 16). Man kann also von einem Übungseffekt ausgehen. Da keine Interaktion zwischen der Bedingung und dem Tag ($p=0,822$, vgl. Tab. 2) nachweisbar ist, können die Daten über die Tage gemittelt werden, um die Bedingungen untereinander vergleichen zu können. Es unterscheiden sich die richtigen Lösungen zwischen

Bedingung A und C ($p=0,012^*$, vgl. Tab.3, Abb. 17) signifikant und zwischen Bedingung A und B ($p=0,056$, vgl. Tab. 3, Abb. 17) tendenziell. Folglich wurde die Aufgabenstellung der Bedingung C und B richtiger gelöst als die der Bedingung A.

Tabelle 3: Ergebnisse des T-Tests bei Vergleich der Untersuchungstage und der Bedingungen untereinander bezüglich objektiv richtiger Lösungen

Bedingung	Mittelwert in %	Standardabweichung in %
A	95,8	3,8
B	97,2	2,8
C	97,0	2,4
Tag 1	95,8	3,6
Tag 2	97,6	2,1
Quelle	Signifikanzwert	
Bedingung A gegen Bedingung B	0,056	
Bedingung B gegen Bedingung C	0,791	
Bedingung A gegen Bedingung C	0,012*	
Tag 1 gegen Tag 2	0,001**	

Tab. 3: Es ist eine Übersicht der statistischen Analyse der objektiv richtigen Lösungen bezüglich der Unterschiede zwischen Untersuchungstagen bzw. Bedingungen (A: Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Zeigefingerspitze und den Zeigefingergrund, B: Aufmerksamkeitslenkung auf die Leuchtdioden unter Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes, C: Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Zeigefinger- und Kleinfingerspitze) dargestellt.

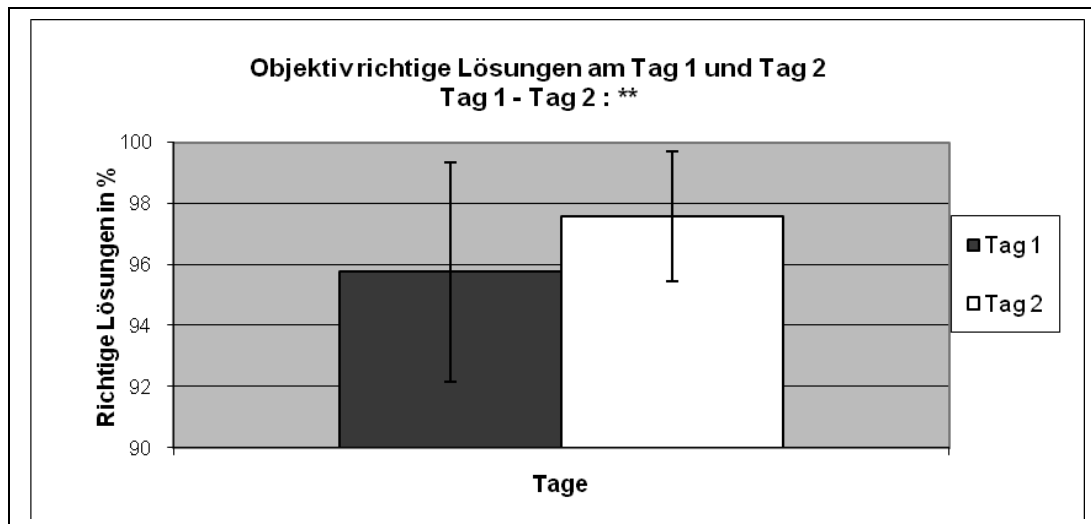


Abb. 16: Abgebildet sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der objektiv richtig gelösten Aufgaben vom Versuchstag 1 im Vergleich zum Versuchstag 2 (Programm: Microsoft Excel 2000).

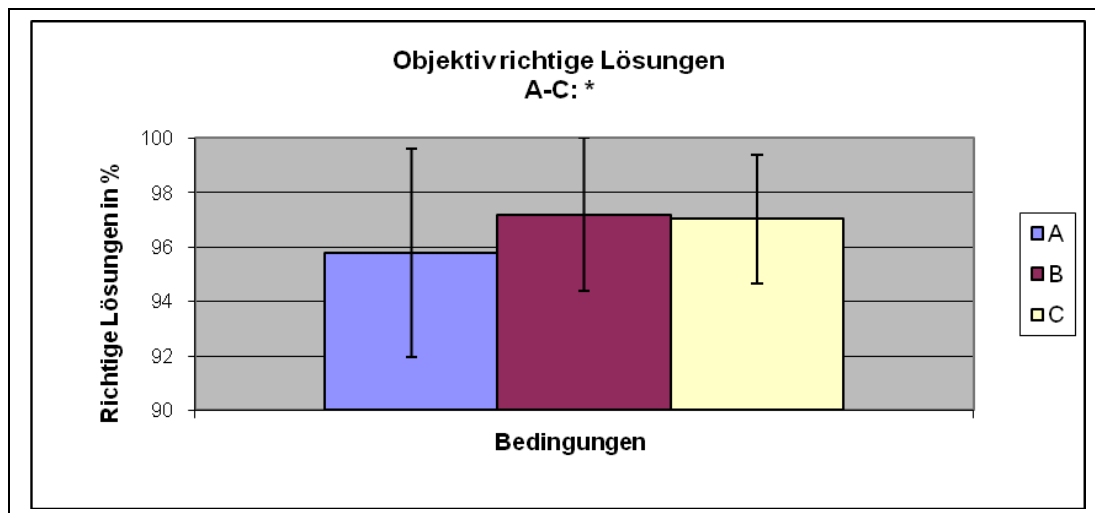


Abb. 17: Die Abbildung soll die Mittelwerte der objektiv richtigen Lösungen und die Standardabweichungen der Aufgaben A, B und C (A: Aufmerksamkeit auf die Zeigefingerspitze und den Zeigefingergrund, B: Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Leuchtdioden unter Stimulation des Zeigefingers, C: Aufmerksamkeitszuwendung auf die Stimulation der Zeige- und Kleinfingerspitze) veranschaulichen (Programm: Microsoft Excel 2000).

Weiterhin sollten die Versuchspersonen nach der Durchführung der Messungen den vermutlichen Anteil richtig gelöster Aufgaben sowie die Einschätzung der Schwierigkeit der Aufgaben angeben.

Überraschenderweise vermuteten die Probandinnen die wenigsten richtigen Lösungen mit $68,4 \pm 20,0$ % bei Aufgabe B (vgl. Abb.19) zu haben, wobei diese objektiv am häufigsten richtig gelöst wurde (vgl. Abb. 17). Folglich liegt scheinbar eine Diskrepanz zwischen Schwierigkeit und Korrektheit der Aufgabenbewältigung vor. Die häufigsten richtigen Antworten wurden mit $75,1 \pm 15,1$ % bei Aufgabe C vermutet. Die richtigen Lösungen wurden bei Aufgabe A mit durchschnittlich $71,9 \pm 12,9$ % angegeben.

Bei der statistischen Analyse der Daten konnte mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test eine Normalverteilung der Daten nachgewiesen werden. Bei der Untersuchung der Daten mit dem Allgemeinen Linearen Modell konnte ein signifikanter Einfluss des Messtages auf die Einschätzung der richtigen Lösungen verzeichnet werden ($p=0,003^{**}$, vgl. Tab. 4). Es konnte kein Einfluss der Bedingungen auf die subjektive Einschätzung der richtig gelösten Aufgaben ($p=0,212$, vgl. Tab. 4) nachgewiesen werden.

Tabelle 4: Ergebnisse des Allgemeinen Linearen Modells bei der statistischen Auswertung der subjektiven Einschätzung richtiger Antworten

Quelle	Epsilon nach Greenhouse-Geisser	F-Wert	Signifikanzwert
Bedingung	0,500	1,824	0,212
Tag	1,000	18,461	0,003**
Bedingung * Tag	0,500	1,076	0,354
Bedingung * Gruppe		0,244	0,659

Es wurde ein T-Test für abhängige Stichproben durchgeführt, um mögliche Unterschiede zwischen den Untersuchungstagen genau darstellen zu können. Dabei konnten äußerst signifikante Unterschiede zwischen den Messtagen ($p=0,000^{***}$, vgl. Tab. 5) gefunden werden. Aus den Mittelwerten der Aufgabeneinschätzung lässt sich erkennen, dass die Probandinnen ihre Ergebnisse am zweiten Versuchstag mit $78,0 \pm 13,6$ % richtigen Antworten deutlich besser einschätzten als am ersten Versuchstag mit $65,5 \pm 16,4$ % richtigen Lösungen (vgl. Tab. 5, Abb. 18). Die Probanden schätzen sich also im Mittel am 2.Messtag besser ein, was wiederum durch einen Trainingseffekt erklärt werden kann. Da bereits mit Hilfe des Allgemeinen Linearen Modells kein Einfluss der Bedingungen auf die Einschätzung der subjektiven Richtigkeit gefunden werden konnte, sind keine weiteren T-Tests erforderlich. Die Einschätzung der subjektiven Richtigkeit wird für die Bedingungen getrennt in der Tabelle 5 und in der Abbildung 19 veranschaulicht.

Tabelle 5: Übersicht von Mittelwerten und Standardabweichungen der subjektiven Richtigkeitseinschätzung in Bezug auf die Bedingungen und den Versuchstag sowie Ergebnisse des T-Tests für abhängige Stichproben bei Überprüfung von signifikanten Unterschieden der subjektiven Richtigkeitseinschätzung zwischen den Messtagen

Bedingung	Mittelwert in %	Standardabweichung in %
A	71,9	12,9
B	68,4	20,0
C	75,1	15,1
Tag 1	65,5	16,4
Tag 2	78,0	13,6
Quelle	Signifikanzwert	
Tag 1 gegen Tag 2	0,000***	

Tabelle 5: Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der subjektiven Richtigkeitseinschätzung bezüglich der Messtage und Bedingungen (A: Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Zeigefingerspitze und den Zeigefingergrund, B: Aufmerksamkeit auf die Leuchtdioden während taktiler Reizung der Zeigefingerareale, C: Aufmerksamkeit auf die Zeigefinger- und Kleinfingerspitze) sowie das Ergebnis des T-Tests für abhängige Stichproben bei der statistischen Analyse von Unterschieden zwischen den Messtagen.

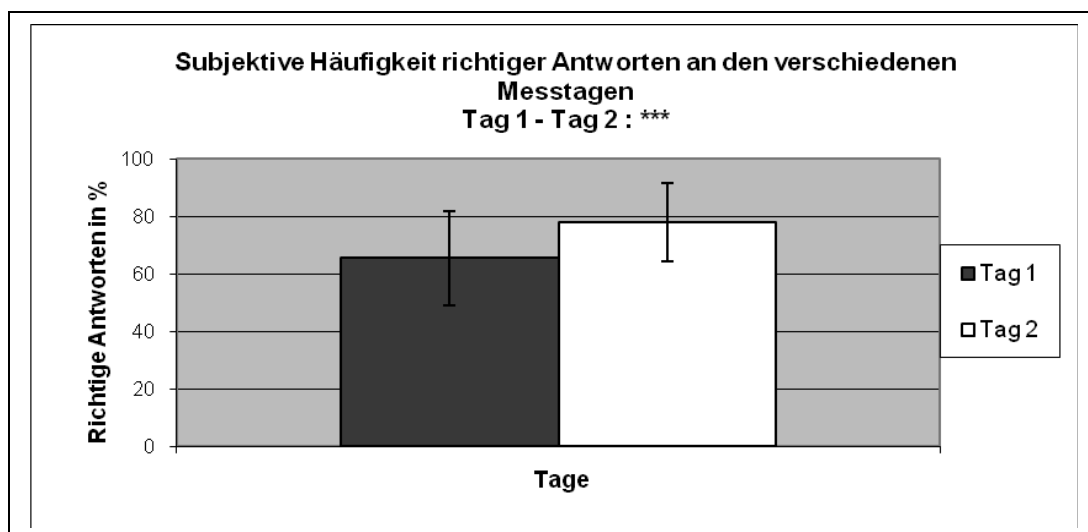


Abb. 18: In der Abbildung sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der subjektiv richtigen Lösungen für die jeweiligen Messtage veranschaulicht (Programm: Microsoft Excel 2000).

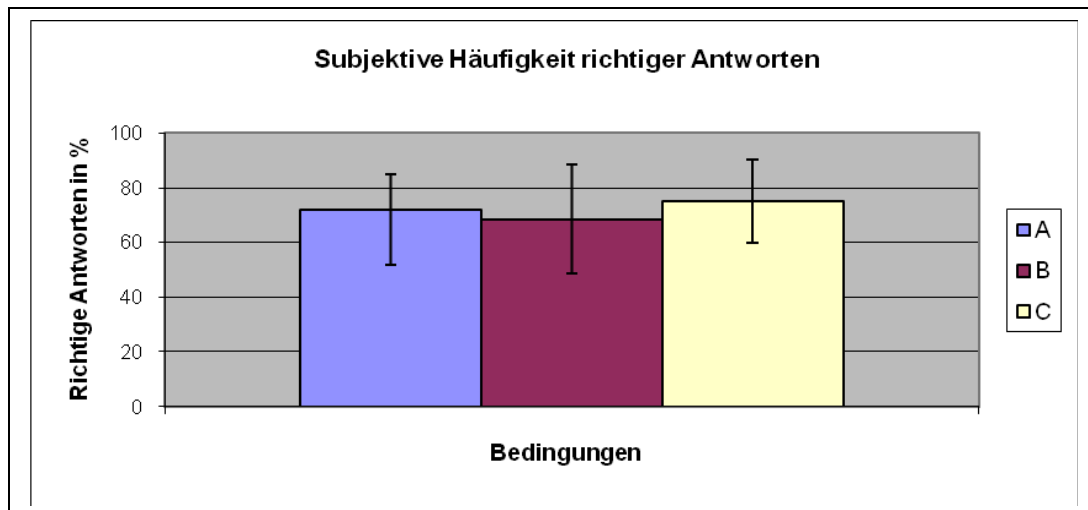


Abb. 19: Mit der Abbildung sollen die Mittelwerte der subjektiven Häufigkeit richtiger Antworten und die Standardabweichungen der Aufgabenstellung A (Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Zeigefingerstimulation), B (Aufmerksamkeitsablenkung durch die Leuchtdioden während der Stimulation der Zeigefingerareale) und C (Aufmerksamkeitslenkung auf die Zeigefinger- und Kleinfingerspitze) veranschaulicht werden (Programm: Microsoft Excel 2000).

Letztendlich sollten die Teilnehmerinnen auch die Schwierigkeit der Aufgabe anhand einer Skala von 0 (sehr leicht) bis 10 (sehr schwer) einschätzen. Die Versuchspersonen schätzten die Aufgabe B mit durchschnittlich 5,3 von 10 Schwierigkeitspunkten am schwersten ein. Als leichteste Aufgabe empfanden die Probandinnen Bedingung C mit 3,7 Punkten. Mäßig schwer wurde die Aufgabe A mit 4,7 Punkten eingeschätzt (vgl. Abb. 21).

Die Daten sind normalverteilt. Bei der statistischen Auswertung der Daten mit dem Allgemeinen Linearen Modell konnte wiederum erkannt werden, dass der Untersuchungstag einen Einfluss auf die Schwierigkeitseinschätzung der Aufgabe hat ($p=0,030^*$, vgl. Tab.6). Für die Bedingung konnte nur ein tendenzieller Einfluss auf die subjektive Schwierigkeitseinschätzung der Aufgabe nachgewiesen werden ($p=0,055$, vgl. Tab. 6). Da sich keine signifikante Interaktion zwischen der Bedingung und dem Tag ergab ($p=0,315$, vgl. Tab.6), konnten die Ergebnisse über die Tage gemittelt werden, um die Bedingungen gegeneinander vergleichen zu können.

Tabelle 6: Ergebnisse des Allgemeinen Linearen Modells bei der statistischen Auswertung der subjektiven Schwierigkeitseinschätzung der Messbedingungen

Quelle	Epsilon nach Greenhouse-Geisser	F-Wert	Signifikanzwert
Bedingung	0,500	4,128	0,055
Tag	1,000	6,980	0,030*
Bedingung * Tag	0,500	1,205	0,315
Bedingung * Gruppe		1,540	0,250

Wie aus den vorhergehenden Ergebnissen zu erwarten, zeigt sich, dass die Versuchsteilnehmerinnen die Aufgaben am ersten Tag signifikant ($p=0,001^{**}$, vgl. Tab. 7) mit $5,1 \pm 2,0$ Punkten schwieriger einschätzten als am zweiten Untersuchungstag ($4,0 \pm 1,9$ Punkte, vgl. Tab. 7, Abb. 20). Es konnte durch Auswertung der über die Tage gemittelten Daten mit den T-Tests für abhängige Stichproben signifikante Unterschiede zwischen den subjektiven Schwierigkeitsangaben der Bedingung A und C ($p=0,041^*$, vgl. Tab.7, Abb. 21) sowie B und C ($p=0,017^*$, vgl. Tab.7, Abb. 21) gefunden werden.

Tabelle 7: Ergebnisse des T-Tests bei Vergleich der Untersuchungstage und der Bedingungen untereinander bei der Auswertung des subjektiven Schwierigkeitsgrades

Bedingung	Mittelwert in %	Standardabweichung in %
A	4,7	2,0
B	5,3	2,1
C	3,7	1,7
Tag 1	5,1	2,0
Tag 2	4,0	1,9
Quelle	Signifikanzwert	
Bedingung A gegen Bedingung B	0,467	
Bedingung B gegen Bedingung C	0,017*	
Bedingung A gegen Bedingung C	0,041*	
Tag 1 gegen Tag 2	0,001**	

Tab. 7: Dargestellt sind die Ergebnisse der T-Tests zur Überprüfung von Unterschieden zwischen den Messtagen bzw. zwischen den Bedingungen (A: Aufmerksamkeit auf Zeigefingerreize, B: Aufmerksamkeitsablenkung von den Zeigefingerreizen und Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Leuchtdioden, C: Aufmerksamkeit auf taktile Reize an der Zeigefinger- und Kleinfingerspitze) bezüglich der subjektiven Einschätzung des Schwierigkeitsgrades.

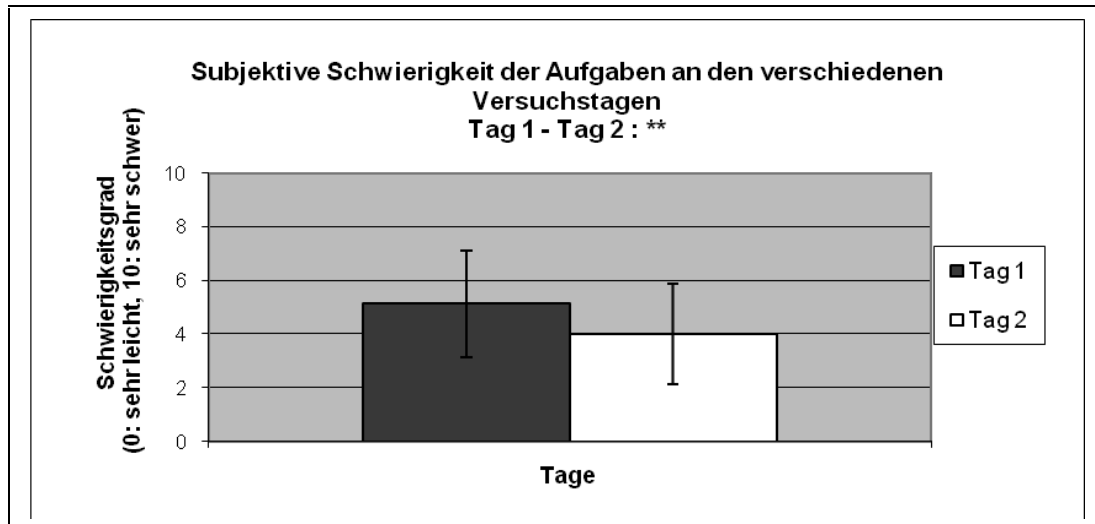


Abb. 20: In der Abbildung sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Einschätzung der subjektiven Schwierigkeit bezüglich der verschiedenen Messtage veranschaulicht (Programm: Microsoft Excel 2000).

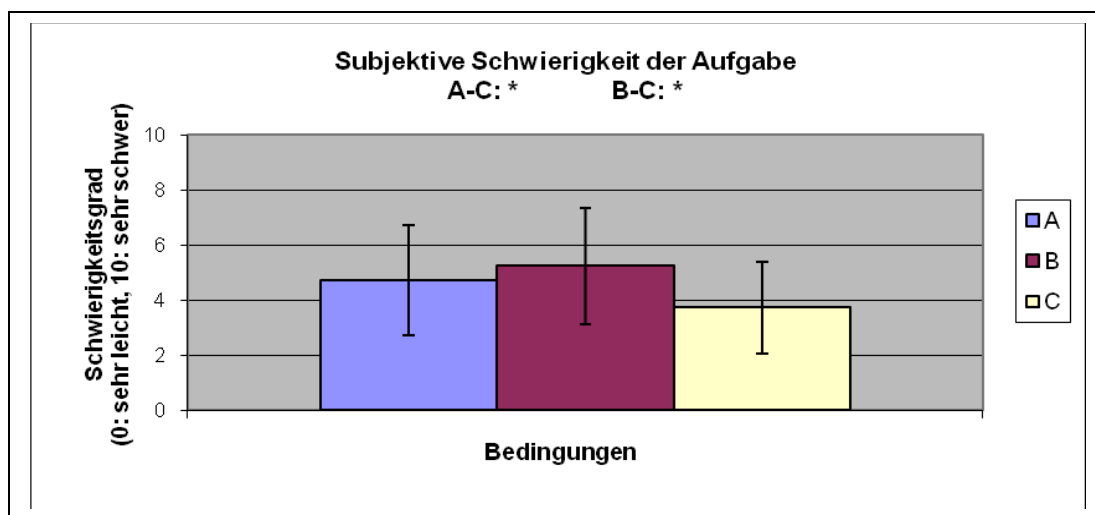


Abb. 21: Dargestellt sind die Mittelwerte der subjektiven Schwierigkeitseinschätzung unter der Vergabe von Schwierigkeitspunkten (0: sehr leicht, 10: sehr schwer) sowie die Standardabweichungen für die Bedingung A (Aufmerksamkeit auf die Zeigefingerspitze und den Zeigefingergrund), B (Aufmerksamkeit auf die Leuchtdioden während der Stimulation der Zeigefingerareale) und C (Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Zeigefinger- und Kleinfingerspitze) (Programm: Microsoft Excel 2000).

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Bedingung C häufiger richtig gelöst wurde als die Bedingung A ($p=0,012^*$, vgl. Tab.3). Es ist anhand der statischen Analyse der Daten ersichtlich, dass die Bedingung C von den Versuchsteilnehmern auch einfacher empfunden wurde als die Bedingung A ($p=0,041^*$, vgl. Tab. 7). Außerdem wird die Bedingung C signifikant einfacher als die Bedingung B ($p=0,017^*$, vgl. Tab. 7) eingeschätzt. Ebenfalls

wurde die Bedingung B im Vergleich zur Bedingung A tendenziell häufiger richtig gelöst ($p=0,056$, vgl. Tab. 3). Allerdings wurde von den Probandinnen die Aufgabe B als die schwierigste Aufgabe eingeschätzt. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass vermutlich teilweise eine Diskrepanz zwischen Schwierigkeit und Korrektheit der Aufgabenbewältigung vorliegt.

Generell wurden die Aufgaben am zweiten Untersuchungstag als einfacher empfunden, so dass man von einem gewissen Übungseffekt ausgehen kann. Auch objektiv konnten am zweiten Untersuchungstag bessere Ergebnisse erzielt werden.

4.3 Auswertung der Messergebnisse mit Überprüfung der Hypothesen

Bei der statistischen Auswertung der Daten wurden die Messwerte für die Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes getrennt voneinander ausgewertet, da die Zeigefingerspitze in allen drei Bedingungen und der Zeigefingergrund nur in der Bedingung A und B stimuliert wurde. Signifikante Ergebnisse konnten nur bei der Zeigefingerspitzenstimulation verzeichnet werden.

Mit Hilfe des Allgemeinen Linearen Modells lässt sich feststellen, dass ein Einfluss der Bedingungen auf die Feld- ($p=0,003^{**}$, vgl. Tab 8) und Dipolstärke ($p=0,034^{*}$, vgl. Tab. 9) existiert. Der Untersuchungstag und die Reihenfolge der durchgeführten Aufgaben bzw. die Gruppenzugehörigkeit scheinen keinen Einfluss auf die Feldstärke (Tag $p=0,507$, Bedingung*Gruppe $p=0,694$, vgl. Tab.8) und Dipolstärke (Tag $p=0,293$, Bedingung*Gruppe $p=0,809$, vgl. Tab.9) auszuüben.

Tabelle 8: Ergebnisse des Allgemeinen Linearen Modells zur Untersuchung des Einflusses der Bedingung, des Untersuchungstages und der Gruppenzugehörigkeit auf die MGFP-Werte bei taktiler Reizung der Zeigefingerspitze

Quelle	Epsilon nach Greenhouse-Geisser	F-Wert	Signifikanzwert
Bedingung	0,500	8,752	0,003**
Tag	1,000	0,482	0,507
Bedingung * Tag	0,500	0,199	0,731
Bedingung * Gruppe		0,363	0,694

Tabelle 9: Ergebnisse des Allgemeinen Linearen Modells zur Untersuchung des Einflusses der Bedingung, des Versuchstages und der Gruppenzugehörigkeit auf die Dipolstärke bei taktiler Reizung der Zeigefingerspitze

Quelle	Epsilon nach Greenhouse-Geisser	F-Wert	Signifikanzwert
Bedingung	0,500	5,055	0,034*
Tag	1,000	1,265	0,293
Bedingung * Tag	0,500	0,404	0,597
Bedingung * Gruppe		0,137	0,809

Außerdem wurde mit dem Allgemeinen Linearen Modell untersucht, ob sich die MGFP-Werte bzw. die Dipolstärken zwischen den Bedingungen signifikant unterscheiden. Zwischen den Bedingungen A und C ($p=0,013^*$, vgl. Tab. 10) sowie B und C ($p=0,006^{**}$, vgl. Tab. 10) fanden sich für die MGFP-Werte signifikante Unterschiede. Auch bei der Dipolstärke unterscheiden sich die Bedingungen B und C ($p=0,003^{**}$, vgl. Tab. 11) signifikant voneinander.

Tabelle 10: Unterschiede zwischen MGFP-Werten der verschiedenen Bedingungen bei Untersuchung der Zeigefingerspitze mit dem Allgemeinen Linearen Modell

Quelle	F-Wert	Signifikanzwert
Bedingung A gegen B	0,530	0,488
Bedingung A gegen C	10,120	0,013*
Bedingung B gegen C	13,330	0,006**

Tab.10: Ergebnisse des Allgemeinen Linearen Modells bei der Überprüfung der Unterschiede zwischen den MGFP-Werten verschiedener Bedingungen (A: Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes; B: Aufmerksamkeitszuwendung auf die Leuchtdioden während Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes; C: Aufmerksamkeitszuwendung auf die Stimulation der Zeige- und Kleinfingerspitze) bei taktiler Stimulation der Zeigefingerspitze.

Tabelle 11: Ergebnisse des Allgemeinen Linearen Modells bei der Untersuchung der Unterschiede zwischen den Dipolstärken der verschiedenen Bedingungen bei Reizung der Zeigefingerspitze

Quelle	F-Wert	Signifikanzwert
Bedingung A gegen B	3,776	0,088
Bedingung A gegen C	0,338	0,577
Bedingung B gegen C	17,161	0,003**

Tab. 11: Ergebnisse des Allgemeinen Linearen Modells bei der Überprüfung der Unterschiede zwischen den Dipolstärken verschiedener Bedingungen (A: Aufmerksamkeitszuwendung auf die Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes; B: Aufmerksamkeitszuwendung auf die Leuchtdioden während Stimulation der Zeigefingerareale; C: Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Stimulation der Zeige- und Kleinfingerspitze) bei taktiler Reizung der Zeigefingerspitze.

Um die Hypothesen zu testen, wurde ein einfacheres Allgemeines Lineares Modell durchgeführt, bei der sowohl der Tag als auch die Gruppe nicht in die Berechnung einbezogen wurden sind. Es lieferte die gleichen Ergebnisse wie ein T-Test für abhängige Stichproben, so dass im Nachfolgenden nur noch der T-Test dargestellt werden soll. Bei den Tests wurden die Mittelwerte aus den Messergebnissen der Bedingung A, B bzw. C vom ersten und zweiten Tag gebildet. Dabei ergaben sich erneut signifikante Unterschiede zwischen den MGFP-Werten der Bedingung A und C ($p=0,009^{**}$, vgl. Tab. 12) sowie der Bedingung B und C ($p=0,005^{**}$, vgl. Tab. 12). Für die Dipolstärken konnte ein signifikanter Unterschied nur zwischen den Bedingungen B und C ($p=0,002^{**}$, vgl. Tab. 13) nachgewiesen werden.

Tabelle 12: Ergebnisse des T-Tests bei der Analyse der MGFP-Werte bei taktiler Stimulation der Zeigefingerspitze

Bedingung	Mittelwert [ft]
A	453,50
B	441,67
C	512,18
Quelle	Signifikanzwert
Bedingung A-B	0,462
Bedingung A-C	0,009**
Bedingung B-C	0,005**

Tab. 12: Ergebnisse des T-Tests für abhängige Stichproben zum Vergleich der MGFP zwischen den Bedingungen (A: Aufmerksamkeitszuwendung auf die Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes; B: Aufmerksamkeit auf die Leuchtdioden während Stimulation der Zeigefingerareale; C: Aufmerksamkeitszuwendung auf die taktile Reizung der Zeige- und Kleinfingerspitze).

Tabelle 13: Ergebnisse des T-Tests bei der statistischen Auswertung der Dipolstärke bei taktiler Stimulation der Zeigefingerspitze

Bedingung	Mittelwert [μ Amm]
A	23,45
B	19,92
C	24,26
Quelle	Signifikanzwert
Bedingung A-B	0,070
Bedingung A-C	0,555
Bedingung B-C	0,002**

Tab. 13: Ergebnisse des T-Tests für abhängige Stichproben zum Vergleich der Dipolstärke zwischen den Bedingungen (A: Aufmerksamkeit auf die Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes; B: Aufmerksamkeitszuwendung auf die Leuchtdioden während Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes; C: Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Stimulation der Zeige- und Kleinfingerspitze).

Bei unserer ersten Hypothese gingen wir davon aus, dass unter Aufmerksamkeitszuwendung das Signal bei Reizung weiter entfernt liegender Fingerareale größer sein müsste, als bei Reizung benachbarter Fingerareale. Folglich erwarten wir in den statistischen Tests ein signifikant größeres Signal für die Bedingung C als für die Bedingung A. Man kann an den Mittelwerten der MGFP (vgl. Tab. 12, Abb. 22) und der Dipolstärke (vgl. Tab. 13, Abb.23) einen tendenziell größeren Wert für die Bedingung C erkennen. Mit Hilfe des Allgemeinen Linearen Modells wurde ein signifikanter Unterschied ($p=0,013^*$, vgl. Tab.10) zwischen der MGFP der Bedingung A und C für die Zeigefingerspitze festgestellt. Dieser Unterschied konnte auch in dem nachfolgenden T-Test für abhängige Stichproben nachgewiesen werden ($p=0,009^{**}$, vgl. Tab.12, Abb. 22). Für die Dipolstärke lässt sich kein Unterschied zwischen der Bedingung A und C nachweisen ($p=0,555$, vgl. Tab.13, Abb. 23). Mit Hilfe unserer Studie konnte erkannt werden, dass ein signifikanter Unterschied der MGFP-Werte zwischen den Stimulationen benachbarter und entfernter Fingerareale existiert. Anhand der Messdaten lässt sich erkennen, dass der Mittelwert für Signale bei Aufmerksamkeitszuwendung auf weiter entfernt liegende Fingerareale größer ist als für benachbarte Fingerareale. Die erste Hypothese kann daher angenommen werden. Dieser Effekt lässt sich mit der Theorie der lateralen Inhibition begründen.

Weiterhin sollte untersucht werden, ob bei selektiver Aufmerksamkeit auf visuelle Reize im somatosensorischen Kortex ein größeres Signal als bei Aufmerksamkeit auf taktile Reize ableitbar sei. Folglich müsste Bedingung B die größten Signale aufweisen. Für die Feld- und Dipolstärke lässt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen B und C

sowohl mit Hilfe des Allgemeinen Linearen Modells (MGFP: $p=0,006^{**}$, vgl. Tab.10; Dipolstärke: $p=0,003^{**}$, vgl. Tab.11) als auch mit Hilfe des T-Tests (MGFP: $p=0,005^{**}$, vgl. Tab.12, Abb. 22; Dipolstärke: $p=0,002^{**}$, vgl. Tab.13, Abb.23) nachweisen. Dabei sind allerdings die Mittelwerte für die Dipolstärke und für die MGFP bei Bedingung C größer als bei der Bedingung B. Folglich konnte nachgewiesen werden, dass bei einer Aufmerksamkeitszuwendung auf die Stimulation von Zeige- und Kleinfingerspitze größere magnetische Signale als bei Aufmerksamkeitsablenkung und gleichzeitiger Stimulation von Zeigefingerspitze und –grund ableitbar sind. Ein Unterschied zwischen den Bedingungen A und B lässt sich für die MGFP nicht nachweisen. Für die Dipolstärke zeigt sich mit Hilfe der ALM ein tendenzieller Unterschied ($p=0,088$, vgl. Tab.11) zwischen den Bedingungen A und B, welcher mit dem T-Test für abhängige Stichproben bestätigt wird ($p=0,070$, vgl. Tab.13). Aus den Messdaten und den T-Tests für abhängige Stichproben lässt sich erkennen, dass die evozierten Signale bei Aufmerksamkeit auf visuelle Reize kleiner sind als bei Aufmerksamkeit auf taktile Reize. Die zweite Hypothese muss demzufolge abgelehnt werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Tag und die Reihenfolge keinen signifikanten Einfluss auf die Werte der Dipol- und Feldstärke bei Zeigefingerspitzenstimulation nehmen. Ein Unterschied zwischen der Bedingung A und B ist nur bei der Dipolstärke tendenziell nachweisbar ($p=0,088$, vgl. Tab 11; $p=0,070$, vgl. Tab.13, Abb.23). Zwischen den Bedingungen A und C ist ein signifikanter Unterschied nur bei der Feldstärke mit den statistischen Tests erkennbar ($p=0,013^{*}$, vgl. Tab.10; $p=0,009^{**}$, vgl. Tab. 12, Abb.22). Ein signifikanter Unterschied ist zwischen den Bedingungen B und C sowohl für die Feld- ($p=0,006^{**}$, vgl. Tab.10, $p=0,005^{**}$ vgl. Tab.12, Abb.22) als auch für die Dipolstärke ($p=0,003^{**}$, vgl. Tab.11, $p=0,002^{**}$, vgl. Tab.13, Abb.23) bei allen verwendeten statistischen Analysen nachweisbar.

Der Zeigefingergrund wurde in Bedingung A und B untersucht, so dass diese beiden Bedingungen miteinander verglichen werden konnten. Jedoch zeigte sich weder in der Feld- (vgl. Abb. 24) noch in der Dipolstärke (vgl. Abb.25) ein signifikanter Unterschied zwischen den zwei Bedingungen.

Die folgenden Diagramme sollen die Werte der Dipolstärke und der MGFP der einzelnen Messbedingungen jeweils für die Zeigefingerspitzenstimulation (vgl. Abb. 22 und 23) und für die Zeigefingergrundstimulation (vgl. Abb. 24 und 25) veranschaulichen:

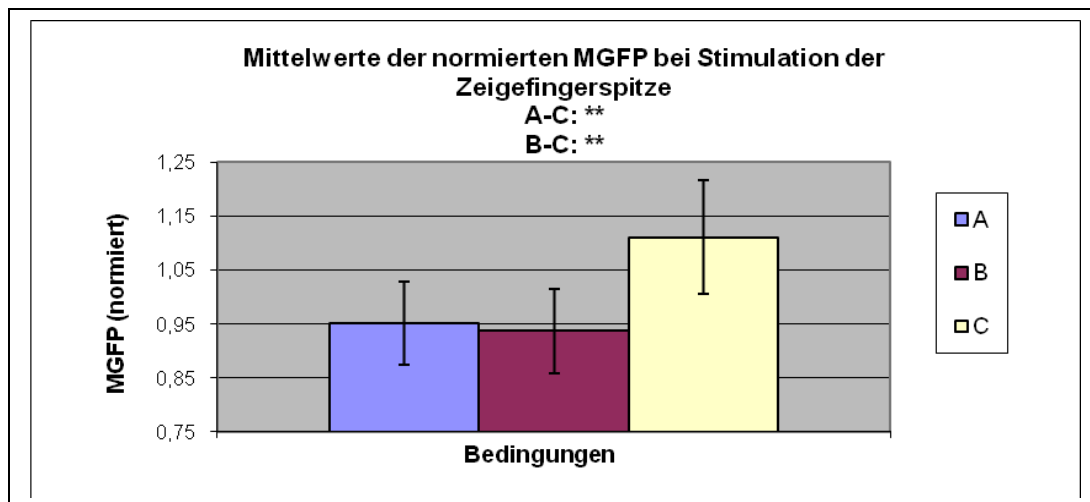


Abb. 22: Für die unterschiedlichen Bedingungen (A: Aufmerksamkeitszuwendung auf die Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes; B: Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Leuchtdioden während Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes; C: Aufmerksamkeitszuwendung auf die Stimulation der Zeige- und Kleinfingerspitze) sind die Mittelwerte und die Standardabweichung der normierten MGFP bei Stimulation der Zeigefingerspitze dargestellt (Programm: Microsoft Excel 2000).

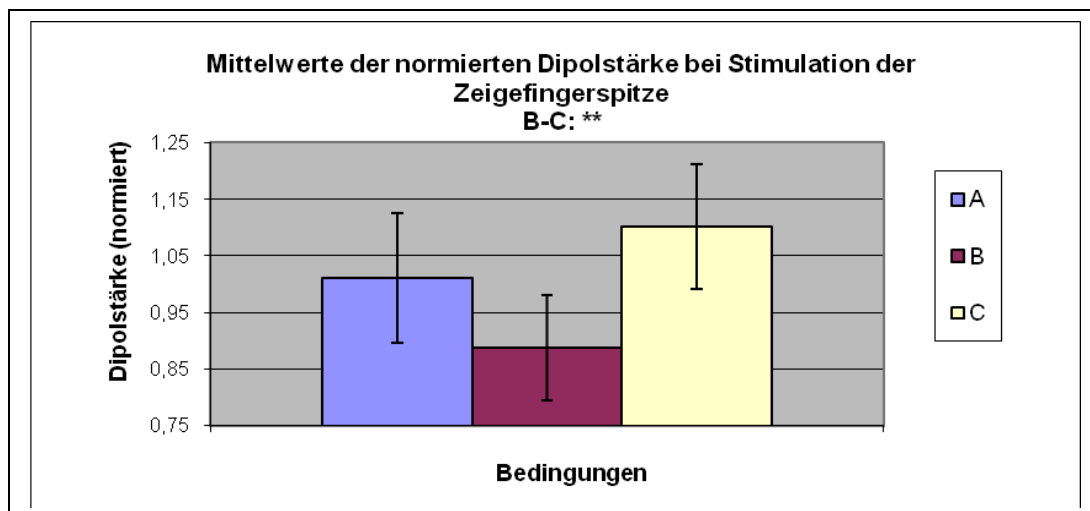


Abb. 23: Es sind die Mittelwerte und die Standardabweichung der normierten Dipolstärken bei Stimulation der Zeigefingerspitze für die unterschiedlichen Bedingungen (A: Aufmerksamkeit auf die stimulierten Zeigefingerareale, B: Aufmerksamkeitsabwendung von den gereizten Zeigefingerarealen auf die Leuchtdioden, C: Aufmerksamkeitsausrichtung auf die stimulierte Zeigefinger- und Kleinfingerspitze) veranschaulicht (Programm: Microsoft Excel 2000).

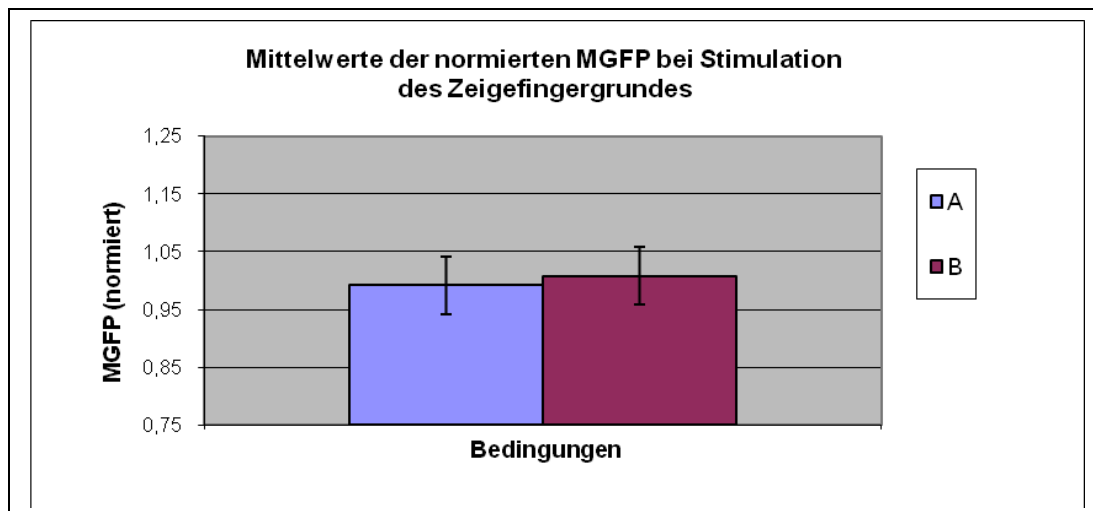


Abb. 24: Im Diagramm werden die Mittelwerte und die Standardabweichungen der normierten MGFP für die Bedingung A und B (A: Aufmerksamkeitszuwendung auf die Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes; B: Aufmerksamkeitszuwendung auf die Leuchtdioden während Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes) während der Stimulation des Zeigefingergrundes dargestellt (Programm: Microsoft Excel 2000).

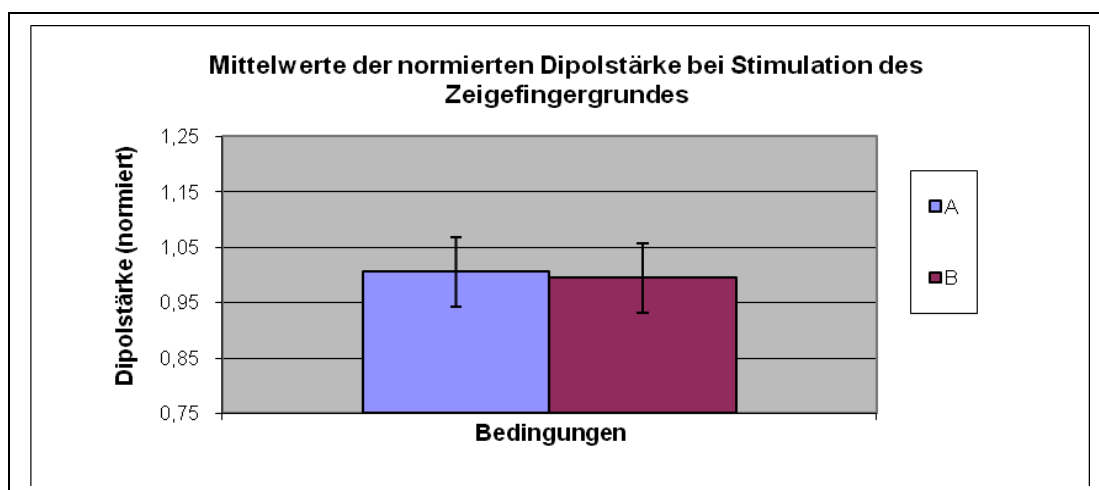


Abb. 25: Dargestellt sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen der normierten Dipolstärke für die Bedingungen A (Aufmerksamkeit auf die Zeigefingerspitzen- und Zeigefingergrundstimulation) und für die Bedingung B (Aufmerksamkeit auf die Leuchtdioden unter Reizung des Zeigefingers) bei Stimulation des Zeigefingergrundes (Programm: Microsoft Excel 2000).

Außerdem wurde mit Hilfe des Allgemeinen Linearen Modells der Einfluss der verschiedenen Aufgaben, des Tages und der Reihenfolge der Aufgabe auf das Hintergrundrauschen untersucht. Man geht davon aus, dass bei einer Aufgabe, die eine hohe Diskrimination des Reizes verlangt, eine starke afferente Inhibition und somit eine mögliche Reduzierung des

Hintergrundrauschens erfolgt (Thomann 2004). Allerdings konnte in der vorliegenden Studie kein signifikanter Unterschied des Hintergrundrauschens zwischen den Bedingungen nachgewiesen werden.

Mit Hilfe des Allgemeinen Linearen Modells konnten die Bedingungen bezüglich der x-, y- und z-Komponente des Dipols bei Zeigefingerspitzenstimulation bzw. des Dipols bei Zeigefingergrundstimulation untersucht werden. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bedingungen.

5 Diskussion

Mit der vorliegenden Studie konnte eine Modulation früher Komponenten der evozierten Signale des primären somatosensorischen Kortex nachgewiesen werden. Es konnte eine unterschiedliche Signalintensität der Feldstärke bei Aufmerksamkeit auf benachbarte bzw. Aufmerksamkeit auf weiter entfernt liegende taktil stimulierte Fingerareale bewiesen werden. Dabei scheinen die Signale bei Aufmerksamkeit auf weiter entfernt liegende Areale größer zu sein als bei Aufmerksamkeitszuwendung auf benachbarte Areale.

Außerdem konnte überraschenderweise festgestellt werden, dass sich unter Aufmerksamkeitszuwendung auf taktil gereizte Fingerareale die somatosensorisch evozierten Felder im Vergleich zur Aufmerksamkeitsablenkung bzw. Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf visuelle Reize tendenziell eher vergrößern.

In mehreren Studien konnte kein Einfluss der Aufmerksamkeit auf evozierte Potentiale im primären somatosensorischen Kortex festgestellt werden (Backes et al. 2000, Fujiwara et al. 2002, Hamada et al. 2003, Hoechstetter et al. 2000 und Mima et al. 1998). Studien von Bartenbach (2004), Eimer und Forster (2003), Garcia-Larrea et al. (1991), Hämäläinen et al. (2000), Hötting et al. (2003), Hsiao et al. (1993), Hyvärinen et al. (1980), Iguchi et al. (2002), Johansen-Berg et al. (2000), Josiassen et al. (1982), Karlowsky (1999), Lam et al. (2001), Meyer et al. (1991), Nelson et al. (2004), Thomann (2004) und Sterr et al. (2007) zeigten einen Einfluss der Aufmerksamkeit auf den primären somatosensorischen Kortex. Dabei ist zu beachten, dass in der MEG-Studie von Bartenbach (2004) und den EEG-Studien von Eimer und Forster (2003) und Hötting et al. (2003) kein Effekt der Aufmerksamkeit auf frühe Komponenten um 45ms nach Stimulusgabe im primären somatosensorischen Kortex erkennbar war. In diesen drei Studien konnte eine erhöhte Signalstärke erst ab etwa 75ms poststimulus bei Aufmerksamkeitszuwendung nachgewiesen werden. Hämäläinen et al. (2000) berichtete in der fMRI-Studie über ein tendenziell, aber kein signifikant größeres Feld unter Aufmerksamkeitszuwendung in SI. Bei den Affenstudien von Hsiao et al. (1993) und Hyvärinen et al. (1980) oder den fMRI-Studien von Hämäläinen et al. (2000) und Johansen-Berg et al. (2000) konnte keine Aussage über den Zeitpunkt der primär somatosensorischen Kortexaktivierung getroffen werden. Eine signifikant höhere Signalstärke bei Aufmerksamkeitszuwendung um 45ms nach Stimulusapplikation zeigt sich in der EEG-Studie von Garcia-Larrea et al. (1991) und der MEG-Studie von Lam et al. (2001).

In Vorläuferstudien am biomagnetischen Zentrum in Jena (Huonker et al. 2005, Karlowsky 1999, Thomann 2004) und in der Studie von Mauguière et al. (1997b) konnte eine Abnahme der Signalintensität in SI bei selektiver Aufmerksamkeit auf taktile Reize nachgewiesen werden. Allerdings konnte in der MEG-Studie von Mauguière et al. (1997b) keine signifikante, sondern nur eine tendenzielle Abnahme der Signalstärke in SI unter Aufmerksamkeitszuwendung gezeigt werden.

Diese unterschiedlichen Effekte der Aufmerksamkeit auf den primären somatosensorischen Kortex können unter anderem durch verschiedene Stimulationsarten, Paradigmen oder Messmethoden hervorgerufen werden, welche im Folgenden dargestellt und diskutiert werden sollen.

Art der taktilen Reizung

Während Bartenbach (2004), Fujiwara et al. (2002), Garcia-Larrea et al. (1991), Lam et al. (2001) und Mauguière et al. (1997b) ihre Studien mittels elektrischer Stimulation durchführten, wurde in der vorliegenden Untersuchung sowie in den Studien von Karlowsky (1999) und Thomann (2004) ein Airpuff-Stimulator genutzt. Die Reizung mittels eines Airpuff-Systems hat den Vorteil, dass die Reizart natürlicher ist als bei einer elektrischen Stimulation. Nachteilig ist allerdings, dass etwa 20-30ms notwendig sind, bis sich ein ausreichender Druck im Airpuff aufbaut, welcher die Membran bewegt. Daher werden die Festlegung eines exakten Stimulus-Onset und das Erkennen der M20 schwieriger (Rossini et al. 1996). Da sowohl Mauguière et al. (1997b) mit elektrischen Stimuli als auch Karlowsky (1999) und Thomann (2004) mit einem Airpuff-Stimulator eine Abnahme der Signalstärke unter Aufmerksamkeitszuwendung finden, nimmt scheinbar die Art der taktilen Reizung keinen Einfluss auf die Signalintensitäten.

Im Gegensatz zu den Airpuff-Stimulator-Studien von Karlowsky (1999) und Thomann (2004) ergab sich in der vorliegenden Airpuff-Studie tendenziell eine Vergrößerung der Signalstärke unter Aufmerksamkeitszuwendung. Daher hat die Art der taktilen Reizung vermutlich keinen Einfluss auf die vorliegenden Studienergebnisse.

Interstimulusintervall, Stimulusrate und Stimulusintensität

Man konnte in verschiedenen Studien einen Einfluss des Interstimulusintervalls (ISI) auf die Signalstärke feststellen. Forss et al. (1995) wies eine Zunahme der Signalstärke bei längeren Interstimulusintervallen nach. Mertens und Lütkenhöner (2000) bezeichnen ein Interstimulusintervall um eine Sekunde als optimal.

Bezüglich der Stimulusrate konnten Desmedt et al. (1983) und Mima et al. (1998) zeigen, dass bei Aufmerksamkeitszuwendung auf seltene Reize größere Signale ableitbar sind.

Mit der Studie von Mima et al. (1998) wurde verdeutlicht, dass die Signalstärke mit einer steigenden Stimulusintensität zunimmt. Allerdings war bei Iguchi et al. (2002) der Effekt der Aufmerksamkeit auf die M50-Quelle bei höherer Stimulusintensität weniger deutlich als bei niedriger Stimulusintensität.

In der vorliegenden Studie wurde versucht, die Intensität der Stimuli, die Stimulusdauer, die Stimulusrate, die Interstimulusintervalle und die Anzahl der Targets zu Non-Targets nicht wesentlich zu variieren. Bei der Bedingung „Aufmerksamkeit auf Zeigefingerspitze und – grund“ beträgt das Interstimulusintervall 650-1150ms, die Stimulusrate etwa 48 Stimuli pro Minute, und das Verhältnis von Targets/Non-Targets gemittelt etwa 376/648. Bei der Ablenkungsbedingung beträgt für die Leuchtdioden das Interstimulusintervall 1250-2050ms, die Stimulusrate etwa 30 Stimuli pro Minute und das Verhältnis von Zielreizen/restliche Reize im Mittel 246/394. Die Parameter der Stimulation des Zeigefingers wurden bei der Ablenkungsbedingung beibehalten. Bei Reizung der Zeigefingerspitze und der Fingerspitze des kleinen Fingers unter Aufmerksamkeitszuwendung beträgt das Interstimulusintervall 650-1150ms, die Stimulusrate etwa 48 Stimuli pro Minute und das Verhältnis von Targets/Non-Targets gemittelt 387/637. Die Stimulusdauer beträgt bei allen drei Bedingungen 350ms. Auch wurde die Stimulusintensität über allen Messbedingungen konstant gehalten. Da der Interstimulusintervall, die Stimulusrate, die Stimulusdauer und das Verhältnis von Zielreizen zu restlichen Reizen bezüglich der Fingerstimulation über alle drei Bedingungen relativ unverändert beibehalten wurde, lassen sich die unterschiedlichen Messergebnisse nicht durch die genannten Messparameter erklären. Vergleicht man die vorliegende Studie mit den Vorläuferstudien von Thomann (2004) und Karlowsky (1999), so ist kein wesentlicher Unterschied der Stimulationsparameter erkennbar.

Stimulationsparadigma

In einem Review von Johansen-Berg et al. (2000) wurde die Affenstudie von Hsiao et al. (1993) mit der Affenstudie von Hyvärinen et al. (1980) verglichen. Dabei wurde erkannt, dass Hyvärinen et al. (1980) nur bei 16% der SI-Zellen eine erhöhte Aktivität unter Aufmerksamkeitszuwendung auf einen Vibrationsreiz feststellen konnte, während Hsiao et al. (1993) bei 50% der SI-Zellen eine erhöhte Aktivität fand. Der Unterschied zwischen den Studienparadigmen ist in der Kontrollbedingung zu finden. Dabei scheint es von Bedeutung zu sein, ob von den Affen intramodale oder intermodale Aufmerksamkeit verlangt wird. Bei

der intramodalen Aufmerksamkeit wird nur ein Sinnessystem zur Wahrnehmung der Reize verwendet. Werden mehrere Sinneseindrücke zu einer Wahrnehmung integriert, so spricht man von einem intermodalen Aufmerksamkeitsprozess. Während Hyvärinen et al. (1980) als Kontrollbedingung den Zustand keiner Aufmerksamkeit nutzte, verlangte Hsiao et al. (1993) als Kontrollbedingung Aufmerksamkeit auf visuelle Reize. Die Signalintensität ist bei einer intramodalen Aufmerksamkeitszuwendung auf Vibrationsreize scheinbar geringer als bei intermodalen Aufmerksamkeitsprozessen, bei denen beispielsweise die Aufmerksamkeit auf visuelle und taktile Reize gerichtet werden muss. Eine ähnliche Entdeckung machten Meyer et al. (1991) in ihrer PET-Studie. Während kein Unterschied der SI-Aktivierung zwischen Aufmerksamkeitszuwendung auf vibrotaktile Reize und keiner Aufmerksamkeit nachgewiesen werden konnte, war eine deutlich stärkere SI-Aktivierung bei Aufmerksamkeit auf vibrotaktile Fingerreize als bei Aufmerksamkeitsausrichtung zur Lösung einer Rechenaufgabe belegbar. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der primäre somatosensorische Kortex bei Aufmerksamkeitsausrichtung auf taktile Reize eine höhere Signalzunahme verzeichnet, wenn eine solche Bedingung mit einer Ablenkungsaufgabe statt einer Aufgabe ohne Aufmerksamkeitserfordernisse verglichen wird.

Karlowsky (1999) und Thomann (2004) untersuchten sowohl eine Neutralbedingung ohne Aufmerksamkeitserfordernisse als auch eine Ablenkungsbedingung mit einer notwendigen Aufmerksamkeitszuwendung auf visuelle Stimuli im Vergleich zur Aufmerksamkeitsausrichtung auf die taktilen Stimuli. Der Hauptunterschied zwischen der vorliegenden Studie und den Vorläuferstudien von Karlowsky (1999) und Thomann (2004) liegt in der Art der Ablenkungsaufgabe. Während alle Probanden auf visuelle Stimuli achten sollten, wurde bei Karlowsky (1999) und Thomann (2004) die Fingerspitzen des Zeige- und Mittelfingers bzw. des Zeige- und kleinen Fingers gereizt. Hingegen wurde in der vorliegenden Studie nur der Zeigefinger an der Fingerspitze und dem Fingergrund taktil stimuliert. Dies ruft vermutlich den Unterschied der Messergebnisse zwischen den Studien hervor. Rezeptive Felder benachbarter Stimulationsorte, z.B. bei Reizung zweier Areale eines Fingers, überlappen sich stärker als rezeptive Felder nicht so stark benachbarter Stimulationsorte. Man könnte vermuten, dass bei Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes die überlappenden rezeptiven Felder teilweise dieselben Zellpopulationen angeregt haben, welche aber eventuell bei dem kurzen Interstimulusintervall (650-1150ms) noch refraktär sein könnten. Jedoch berichteten Mertens und Lütkenhöner (2000) erst ab einem Interstimulusintervall kleiner als 500ms von einem erhöhten Risiko, dass sich rezeptive Antworten auf sukzessive Reize überlappen und den Dipol beeinträchtigen könnten. Sie

gaben daher einen Interstimulusintervall um 1 Sekunde als optimal an. Einen weiteren Einfluss auf die Messergebnisse könnte die Rezeptordichte haben. Bei der Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes werden vermutlich weniger Rezeptoren aktiviert als bei der Stimulation von Fingerspitzen, da die Rezeptordichte in den Fingerspitzen höher ist als am Fingergrund (vgl. Abb. 2). Wahrscheinlich unterscheiden sich die vorliegenden Messergebnisse von denen der Vorläuferstudien, weil das Studienparadigma der Ablenkungsbedingung verändert wurde. Während in der vorliegenden Studie bei Aufmerksamkeitsausrichtung auf die Leuchtdioden die Zeigefingerspitze und der Zeigefingergrund taktil stimuliert wurde, reizten Karlowsky (1999) und Thomann (2004) die Fingerspitzen des Zeige- und Mittelfingers bzw. des Zeige- und kleinen Fingers

Messmethode

Zur Untersuchung des somatosensorischen Kortex wird die Elektroenzephalographie (Braun et al. 2000, Desmedt et al. 1983, Garcia-Larrea et al. 1991), die Magnetoenzephalographie (Bartenbach 2004, Forss et al. 1995, Hoechstetter et al. 2000, Iguchi et al. 2005, Karlowsky 1999, Lam et al. 2001, Mauguière et al. 1997a, Mauguière et al. 1997b, Mima et al. 1998, Thomann 2004), die Positronenemissionstomographie (Meyer et al. 1991) und die funktionelle Magnetresonanztomografie (Hämäläinen 2000, Johansen-Berg 2000) genutzt.

Die vorliegende Studie wurde mittels der Magnetoenzephalographie durchgeführt, welche einige Vorteile aufweist. Mittels der MEG können vor allem tangentiale Dipole gut erfasst werden. Die Area 3b liegt seitlich des Gyrus postcentralis, so dass die entstehenden Dipole eher tangential sind. Außerdem hat die Magnetoenzephalographie in Kombination mit der funktionellen Magnetresonanztomographie eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung. Da magnetische Signale vom Gewebe, welches das Gehirn umgibt, weniger beeinflusst werden als elektrische Signale, ist die räumliche Dipollokalisierung mittels der

Magnetoenzephalographie gegenüber der Elektroenzephalographie genauer. Im Biomagnetischen Zentrum ist zum Zeitpunkt der Studie leider nur ein 31-Kanal-System für Messungen verfügbar gewesen. Ein Nachteil des 31-Kanal-Systems gegenüber einem Helmsystem ist, dass es in vielen Varianten über dem zu messenden Kopfbereich platziert werden kann. Außerdem sind Voruntersuchungen erforderlich, um die Hirnstrukturen abzugrenzen, in welchen der Dipol lokalisiert werden wird. In unserer Studie wurde eine Medianusreizung als Voruntersuchung durchgeführt. Ein weiterer Nachteil der MEG-Methode ist, dass die magnetischen Signale nur eine geringe Intensität aufweisen. Auch kann

es Probleme bereiten, dass sich keine ferromagnetischen Gegenstände in der Messkammer befinden dürfen.

Da bei den Vorläuferstudien von Karlowsky (1999) und Thomann (2004) am biomagnetischen Zentrum Jena ebenfalls ein 31-Kanal-System genutzt wurde, kann die Messmethode nicht die unterschiedlichen Messergebnisse im Vergleich zur vorliegenden Studie erklären.

Quellenrekonstruktion

Alle Hauptpeaks lagen in einem Zeitbereich von 39ms bis 68ms. Dieser Zeitbereich deckt sich in etwa mit dem Zeitbereich der M50-Komponente von 40 bis 70ms der Studie von Iguchi et al. (2005). Auch in der Studie von Thomann (2004) wird die M46 und in der Studie von Karlowsky (1999) die M45-Komponente untersucht. Bartenbach (2004) konnte in ihrer Studie keine Modulation der M45-Komponente durch Aufmerksamkeit nachweisen. Alle rekonstruierten Dipole lagen in der Area 3b des primären somatosensorischen Kortex. Der Restfehler des Dipolfits sollte für die berechnete Dipolstärke nicht mehr als 15% betragen. Bei 7 von 60 Dipolstärken der Zeigefingerspitze und bei 4 von 40 Dipolstärken des Zeigefingergrundes betrug der Restfehler mehr als 15%. Ein solcher fehlerreicher Dipolfit kann bei einem ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnis entstehen. Auch ist es möglich, dass ein großer Restfehler durch radiale Dipole entsteht, die mittels MEG nur ungenau gemessen werden.

Einfluss der selektiven Aufmerksamkeit auf somatosensorisch evozierte Potentiale

In der vorliegenden Studie sollten die Probandinnen taktile Reize an der Zeigefingerspitze, dem Zeigefingergrund und der Kleinfingerspitze ihrer rechten Hand erkennen. Bei Wiederholung der Reizung am selben Stimulationsort waren die Versuchsteilnehmer angehalten, ein Bällchen mit ihrer linken Hand zu drücken. Bei der Ablenkungsbedingung wurden die Probandinnen angewiesen, auf eine Leuchtdiode zu achten, die ihre Farbe wechselte. Dabei sollten sie wieder das Bällchen drücken, wenn sich die aufleuchtende Farbe (rot oder grün) nach einer Zwischenfarbe (stets gelb) wiederholte. Während dieser Ablenkungsbedingung wurden weiterhin die Zeigefingerspitze und der Zeigefingergrund gereizt.

Mit der vorliegenden Studie konnte eine Modulation der M50-Komponente durch selektive Aufmerksamkeit nachgewiesen werden. Bei selektiver Aufmerksamkeit auf die Zeigefinger- und Kleinfingerspitze war ein größeres Signal als bei Aufmerksamkeit auf die Leuchtdioden,

währenddessen nur der Zeigefinger stimuliert wurde, evozierbar. Außerdem lässt sich aus den Messdaten eine tendenziell höhere Signalintensität bei selektiver Aufmerksamkeit auf die Zeigefingerspitze und den Zeigefingergrund als bei Aufmerksamkeit auf die Leuchtdioden erkennen, was mit den statistischen Tests bei der Dipolstärke ansatzweise belegt werden konnte. Eine Änderung der Dipolstärke geht mit einer Änderung der Quellenaktivität einher.

Diese Ergebnisse stehen zwar im Widerspruch zu Vorläuferstudien am Biomagnetischen Zentrum Jena (Karlowsky 1999, Thomann 2004), sind aber konsistent mit Studien von Bartenbach (2004), Eimer und Forster (2003), Garcia-Larrea et al. (1991), Hämäläinen et al. (2000), Hötting et al. (2003), Hsiao et al. (1993), Hyvärinen et al. (1980), Iguchi et al. (2002), Johansen-Berg et al. (2000), Lam et al. (2001), Meyer et al. (1991), Nelson et al. (2004) und Sterr et al. (2007), welche eine erhöhte neuronale Aktivität in SI unter Aufmerksamkeitszuwendung auf somatosensorische Reize feststellen konnten.

In der Studie von Thomann (2004) konnte ein höheres Signal bei Aufmerksamkeit auf die Leuchtdioden während der Stimulation von Zeigefinger und kleinen Finger im Vergleich zur selektiven Aufmerksamkeit auf die taktilen Reize nachgewiesen werden. Eine solche Bedingung wurde in der vorliegenden Studie nicht verwendet, da während der Ablenkungsbedingung nur der Zeigefinger stimuliert wurde.

In der Studie von Karlowsky (1999) wurde während der Aufmerksamkeit auf die Leuchtdioden der Zeigefinger und kleine Finger stimuliert, so dass diese Bedingung wiederum nicht mit unserer Leuchtdioden-Bedingung vergleichbar ist.

Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass Karlowsky (1999) keine One-back-Aufgabe während der Lichtbedingung nutzte. Die Versuchsteilnehmerinnen mussten sich also nicht an den vorhergehenden Reiz erinnern, um die Aufgabe zu lösen. Sie sollten das Bällchen drücken, wenn zwei Leuchtdioden zugleich aufleuchteten. Bei der damaligen Aufgabe waren demzufolge keine Gedächtnisprozesse notwendig, was zu anderen Ergebnissen geführt haben könnte. Eine One-back-Aufgabe wurde aber in beiden Studien bei Aufmerksamkeit auf die taktilen Reize gestellt. In der vorliegenden Studie können alle Ergebnisse durch Prozesse des Arbeitsgedächtnisses beeinflusst sein.

Karlowsky (1999) vermutete, dass die geringe Signalintensität in SI bei Aufmerksamkeit auf taktile Reize im Vergleich zur Aufmerksamkeitsausrichtung auf visuelle Reize durch ein hemmendes Neuronenumfeld entsteht. Daher nahmen wir an, dass bei einer Aufmerksamkeitsausrichtung auf benachbarte Fingerareale ein geringeres Signal evozierbar ist als bei Aufmerksamkeitsausrichtung auf weiter entfernt liegende Areale. Anhand der

Messdaten und der statistischen Analyse können wir diese Behauptung annehmen. Bei Reizung weiter entfernt liegender Hautareale konnte die größte Signalintensität gemessen werden und mittels des Allgemeinen Linearen Modells und des T-Tests konnten wir einen signifikanten Unterschied der ermittelten Feldstärke bei Aufmerksamkeit auf taktile Reize des Zeigefingergrundes und der –spitze bzw. der Zeigefingerspitze und der Kleinfingerspitze nachweisen. Folglich kann mit der vorliegenden Studie die Theorie der lateralen Inhibition im primären somatosensorischen Kortex befürwortet werden.

Thomann (2004) untersuchte ebenfalls den Unterschied zwischen der Aufmerksamkeit auf benachbarte Finger (Zeige- und Mittelfinger) und weiter entfernt liegende Finger (Zeige- und kleiner Finger). Bei ihrer Studie konnte kein signifikanter Effekt der Entfernung taktiler Reize auf die Signalstärke nachgewiesen werden. Die Messergebnisse ihrer Studie scheinen aber auch zu einer erhöhten Signalintensität bei Aufmerksamkeit auf weiter entfernte taktil gereizte Areale bei Stimulation des Zeigefingers und kleinen Fingers als bei Aufmerksamkeit auf benachbarte Areale bei Stimulation von Zeige- und Mittelfinger zu tendieren. Vermutlich war die Probandenanzahl der Studie von Thomann (2004) sowie der vorliegenden Studie zu gering, um bei allen Messparametern und Messbedingungen einen signifikanten Effekt der Entfernung taktiler Reize auf die Signalstärke im primären somatosensorischen Kortex hervorzurufen.

Weiterhin können die Innervationsdichte der gereizten Hautareale und die nervale Versorgung der Fingerareale eine Rolle bei der Signalintensität im somatosensorischen Kortex spielen. Bei Reizung der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes ist vermutlich eine höhere Diskriminationsleistung erforderlich, als bei Reizung der Zeige- und Kleinfingerspitze, da die distalen Fingerregionen eine höhere RA-Sensorendichte besitzen als die proximalen Fingerareale. (vgl. Abb. 2).

Ebenso muss beachtet werden, dass die Innervation der Palmarseite des Zeige- und Mittelfingers durch den N. medianus erfolgt, der kleine Finger aber durch den N. ulnaris innerviert wird.

Um die Theorie der lateralen Umfeldhemmung im somatosensorischen Kortex vollends zu bestätigen, wurde zu Beginn der Studie die höchste Signalintensität im primären somatosensorischen Kortex bei Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf visuelle Reize erwartet. Allerdings zeigte sich überraschenderweise die geringste Signalintensität bei Aufmerksamkeit auf die Leuchtdioden. Man muss dabei aber beachten, dass nur bei einem veränderten Stimulationsparadigma mit der Reizung von Zeige- und kleinem Finger (Bedingung C) statt

der Reizung des Zeigefingers (Bedingung B) ein signifikanter Unterschied zwischen der Aufmerksamkeitszu- und abwendung auf taktile Stimuli nachweisbar war. Der Effekt der geringsten Signalintensität bei Aufmerksamkeitslenkung auf visuelle Reize könnte durch eine Interaktion zwischen der visuellen und der taktilen Reizung hervorgerufen sein. Bereits 2001 berichtete Lam et al. in einer MEG-Studie von einer Beeinflussung der taktilen Verarbeitung durch visuelle Stimulation. Auch wäre denkbar, dass Neurone in SI durch polymodale Neurone der Area 5 und 7 des sekundär somatosensorischen Kortex beeinflusst werden. Allerdings erfolgt eine Informationsverarbeitung in SII erst zu späteren Latenzen.

Vergleicht man die vorliegende Studie mit der Studie von Karlowsky (1999) und Thomann (2004) bezüglich der Fehlerrate, so ist ersichtlich, dass bei allen drei Studien die meisten Fehler während der Aufmerksamkeitsausrichtung auf die taktilen Reize gemacht wurden. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Fehlerrate vermutlich keinen Einfluss auf die unterschiedlichen Messergebnisse bezüglich der Aufmerksamkeitsausrichtung- und Ablenkungsbedingung der Studien hat.

Alle bisherigen dargestellten Untersuchungsergebnisse beziehen sich auf die evozierten Felder der Zeigefingerspitze. Bei der Untersuchung des Zeigefingergrundes konnte kein Unterschied zwischen der Aufmerksamkeit auf die taktilen Reize und der Aufmerksamkeit auf die Leuchtdioden verifiziert werden. Ein Grund hierfür könnte die geringere RA-Rezeptorendichte am Zeigefingergrund verglichen mit der Zeigefingerspitze sein. Außerdem ist es gut vorstellbar, dass unsere Fingerspitzen besser für die Diskrimination taktiler Reize ausgelegt sind, als die proximalen Fingerareale.

Evozierte Felder der Kleinfingerspitze traten nur bei der Bedingung „Aufmerksamkeit auf weiter entfernt liegende Areale“ (Bedingung C) auf, so dass kein Vergleich mit anderen Messbedingungen möglich war. Die Felder der Kleinfingerspitze wurden daher nicht weiter untersucht.

Gatingeffekte

Es ist vorstellbar, dass die Modulation des primären somatosensorischen Kortex auch durch die Antwortreaktion, also dem Drücken des Bällchens, hervorgerufen werden könnte.

Allerdings ist eine solche Modulation unwahrscheinlich, da die taktilen Reize an der rechten Hand wahrgenommen werden und das pneumatische Bällchen mit der linken Hand gedrückt wird. Karlowsky (1999) untersuchte diesen Effekt bereits in ihrer Studie, indem sie alle evozierten Potentiale der Stimuli, welche auf ein Target folgten, mit den übrigen Potentialen

verglichen. Dabei zeigte sich kein wesentlicher Unterschied. Das Vorliegen eines Gatingeffektes ist infolgedessen sehr unwahrscheinlich.

Abschließende Betrachtungen

In der vorliegenden Studie zeigte sich tendenziell eine größere Signalintensität evozierter Felder im primären somatosensorischen Kortex bei Aufmerksamkeit auf taktil gereizte Zeigefingerareale (Bedingung A) im Vergleich zur Aufmerksamkeitsablenkung von taktil gereizten Zeigefingerarealen (Bedingung B). Allerdings sollte beachtet werden, dass ein signifikanter Unterschied nur bei einem veränderten Stimulationsparadigma zwischen Aufmerksamkeitszuwendung auf die taktil gereizten Zeige- und Kleinfingerareale (Bedingung C) und der Aufmerksamkeitsablenkung von den gereizten Zeigefingerarealen (Bedingung B) nachweisbar ist. Ein Nachweis einer höheren Signalintensität im primären somatosensorischen Kortex bei Aufmerksamkeitsausrichtung auf taktile Reize wäre konsistent mit den meisten bisher veröffentlichten Studien. In den Vorläuferstudien von Karlowsky (1999) und Thomann (2004) wurden allerdings kleinere Signalstärken evozierter Felder im SI-Kortex bei Aufmerksamkeit auf somatosensible Reize als bei Aufmerksamkeitsablenkung unter der Stimulation von Zeige- und kleinen Finger nachgewiesen. Der Hauptunterschied lässt sich vor allem in der Ablenkungsbedingung finden. Während Karlowsky (1999) und Thomann (2004) bei der Aufmerksamkeitszuwendung auf die Leuchtdioden stets zwei Fingerspitzen (Zeige- und Mittelfinger bzw. Zeige- und kleinen Finger) taktil stimulierten, wird in der vorliegenden Studie bei der Ablenkungsbedingung nur der Zeigefinger an zwei Stimulationsorten taktil gereizt. Dadurch könnten sich die rezeptiven Felder der eng benachbarten Stimulationsorte überlappen und zum Teil dieselben Zellpopulationen aktivieren. Bei dem kurzen Interstimulusintervall könnten einige dieser Zellpopulationen noch refraktär sein, so dass das Signal kleiner ist als bei Stimulation weiter entfernt liegender Fingerareale. Allerdings liegt ein optimales Interstimulusintervall um 1 Sekunde (Mertens und Lütkenhöner 2000), so dass das in der vorliegenden Arbeit verwendete Interstimulusintervall von 650-1150ms keinen Einfluss auf die primär evozierten Potentiale nehmen sollte. Außerdem könnte die geringere Rezeptordichte am Fingergrund ein kleineres Potential hervorrufen. Auch wäre denkbar, dass die unterschiedliche nervale Versorgung der Finger eine Rolle bei der Signalverarbeitung im primären somatosensorischen Kortex spielt. Als einen weiteren Unterschied zwischen der vorliegenden Arbeit und der Studie von Karlowsky (1999) findet man, dass während der Ablenkungsbedingung von Karlowsky (1999) keine One-back-task genutzt wurde. Hingegen wurde in der vorliegenden Studie bei

allen Bedingungen eine One-back-Aufgabe eingesetzt, so dass alle Messergebnisse Prozesse des Arbeitsgedächtnisses unterliegen können.

Interessant wäre es, in einer neuen Studie den Einfluss unterschiedlicher taktiler Stimulationen während der Ablenkungsbedingung zu überprüfen. Bei Thomann (2004) sind bereits zwei verschiedene Ablenkungsbedingungen (Reizung des Zeige- und kleinen Fingers als „Weit“-Bedingung sowie Reizung des Zeige- und Mittelfingers als „Nah“-Bedingung) in der Studie untersucht worden. Allerdings ließ sich nur für die „Weit“-Bedingung ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der Aufmerksamkeitszuwendung und -ablenkung finden.

Es ist außerdem mit der vorliegenden Studie ansatzweise gelungen, höhere Signalstärken bei Aufmerksamkeit auf weiter entfernt liegende taktil stimulierte Fingerareale nachzuweisen. Es konnten signifikant größere MGFP-Werte unter Aufmerksamkeitszuwendung auf taktile Reize bei Stimulation der Zeige- und Kleinfingerspitze (Bedingung C) als bei Stimulation der Zeigefingerspitze und des Zeigefingergrundes (Bedingung A) belegt werden. Dieser Effekt kann durch die Theorie der lateralen Inhibition erklärt werden. Um eine Abnahme der Signalstärken für die M50-Komponente bei taktiler Reizung benachbarter Fingerareale für alle Messparameter zu verifizieren, wäre die Wiederholung der Studie mit einer höheren Probandenzahl und einem Helmsystem als Messvorrichtung sinnvoll.

Auch ist zu bedenken, eventuell eine klinische Studie mit einem ähnlichen Versuchsdesign durchzuführen. So könnten vielleicht Unterschiede bezüglich evozierter Potentiale zwischen Probanden und Patienten, welche an einer Aufmerksamkeitsstörung erkrankt sind, erkannt werden.

6 Schlussfolgerungen

Eine Modulation primär somatosensorisch evozierter Felder durch Aufmerksamkeit konnte mit der vorliegenden Studie nachgewiesen werden. Es konnten signifikant größere Signale bei Aufmerksamkeit auf weiter entfernt liegende Fingerareale als bei Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf benachbarte Fingerareale gefunden werden. Außerdem waren stärkere Signalaktivitäten bei Aufmerksamkeit auf entfernt liegende Fingerareale im Vergleich zur Ablenkungsbedingung mit Aufmerksamkeitsausrichtung auf Leuchtdioden und taktiler Reizung von Zeigefingerarealen ableitbar. Beim direkten Vergleich der Aufmerksamkeitsausrichtung und –ablenkung auf bzw. von Zeigefingerreizen ergaben sich nur tendenziell größere Signale bei der Aufmerksamkeitszuwendung auf die taktilen Reize des Zeigefingers. Die Ergebnisse der Studie können unter anderem durch Prozesse der lateralen Inhibition, durch Einflüsse des Arbeitsgedächtnisses, durch einen Einfluss der visuellen Stimulation auf die taktile Verarbeitung oder durch eine unterschiedliche Innervation und Mechanosensordichte an der Hand erklärt werden. Welche Prozesse inwiefern einen Einfluss auf den primären somatosensorischen Kortex haben, muss in zukünftigen Studien noch geklärt werden.

Es ist wichtig, Aufmerksamkeitsprozesse vollends zu verstehen, da Aufmerksamkeitsstörungen bei vielen neurologischen und psychiatrischen Krankheitsbildern eine wichtige Rolle spielen. Außerdem wäre es denkbar, dass die Magnetoenzephalographie in Zukunft als eine Methode zur Diagnose von Aufmerksamkeitsstörungen genutzt werden kann. Dabei könnte vor allem die gute zeitliche Auflösung der MEG von Vorteil sein.

Interessant wäre, eine ähnliche Studie mit einer größeren Stichprobenzahl und mehreren Messbedingungen zu wiederholen. Dabei wäre es vielleicht mit einem Helmsystem möglich, vier Aufgaben mit einem ähnlichen Stimulationsparadigma nacheinander zu stellen. So könnte eine zweite Ablenkungsbedingung in das Studiendesign aufgenommen werden, bei der Zeige- und Kleinfingerspitze stimuliert werden.

7 Literatur- und Quellenverzeichnis

- Allport DA. 1987. Selection for action: Some behavioural and neurophysiological considerations of attention and action. In: Herer H, Sanders AF, Hrsg. Perspectives on Perception and Action. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 395-419.
- Anderson JR. 2001. Aufmerksamkeit und Leistung. In: Graf R, Grabowski J, Hrsg. Kognitive Psychologie. Dritte Aufl. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 75-106.
- Backes WH, Mess WH, van Kranen-Mastenbroek V, Reulen JPH. 2000. Somatosensory cortex response to median nerve stimulation: fMRI effects of current amplitude and selective attention. Clinical Neurophysiology, 111:1738-1744.
- Balish M., Muratore R. 1990. The Inverse Problem in Electroencephalography and Magnetoencephalography. In: Susumo Sato, Hrsg. Advances in Neurology. New York: Raven Press, 54:79-88.
- Bartenbach B. 2004. Effekte selektiver Aufmerksamkeit auf frühe Komponenten somatosensorisch evozierter Felder im primär sensomotorischen Kortex [Dissertation]. Jena: Friedrich-Schiller-Universität, Medizinische Fakultät.
- Bartsch P. 1993. Sensorische Systeme und Hirnfunktionen. In: Schauf CL, Moffett DF, Moffett SB, Schubert E, Hrsg. Medizinische Physiologie. New York/Berlin: De-Gruyter-Lehrbuch-Verlag, 135.
- Birbaumer N, Schmidt RF. 2006. Biologische Psychologie. Sechste Aufl. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Bortz J. 2005. Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Sechste Aufl. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Braak H, Braak E. 2004. Neokortex (Isokortex). In: Benninghoff A, Drenckhahn D, Hrsg. Anatomie: Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie, Band 2. 16te Auflage, München: Urban & Fischer Verlag, 494.

- Braun C, Schweizer R, Elbert T, Birbaumer N, Taub E. 2000. Differential Activation in Somatosensory Cortex for Different Discrimination Tasks. *The Journal of Neuroscience*, 20(1):446-450.
- Broadbent DE. 1958. *Perception and communication*. London: Pergamon Press.
- Büchel C, Weiller C. 2006. Bildgebende und elektrische/magnetische Verfahren in der Neurophysiologie. In Hartje W, Poeck K, Hrsg. *Klinische Neuropsychologie*. Sechste Aufl. Stuttgart, New York: Georg-Thieme Verlag, 52-66.
- Bühl A. 2006. *SPSS 14 - Einführung in die moderne Datenanalyse*. Zehnte Aufl. München: Pearson Studium.
- Cohen R. 1993. *The Neuropsychology of attention*. New York: Plenum Press.
- Corbetta M, Miezin FM, Shulmann GL, Petersen SE. 1993. A PET-study of visuospatial attention. *Journal of Neuroscience*, 13(3):1202-1226.
- Crick F. 1984. Function of the thalamic reticular complex: The searchlight hypothesis. *Neurobiology*, 81:4586-4590.
- Desmedt JE, Huy NT, Bourguet M. 1983. The cognitive P40, N60 and P100 components of somatosensory evoked potentials and the earliest electrical signs of sensory processing in man. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 56:272–282.
- Desmedt JE, Robertson D. 1977. Differential enhancement of early and late components of the cerebral somatosensory evoked potentials during forced-paced cognitive tasks in man. *J Physiol-Lond*, 271:761–782.
- Deutsch IA, Deutsch D. 1963. Attention: some theoretical considerations, *Psychological Review*, 70:80-90.
- Dössel O. 2000. *Bildgebende Verfahren in der Medizin - Von der Technik zur medizinischen Anwendung*. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag.

- Ducla-Soares E. 1990. Modeling in Magnetoencephalography. In: Susumo Sato, Hrsg. *Advances in Neurology*. New York: Raven Press, 54:95-99.
- Dudel J. 2000a. Informationsvermittlung durch elektrische Erregung. In: Schmidt RF, Thews G, Lang F, Hrsg. *Physiologie des Menschen*. 28te Aufl. New York, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 20-42.
- Dudel J. 2000b. Erregungsübertragung von Zelle zu Zelle. In: Schmidt RF, Thews G, Lang F, Hrsg. *Physiologie des Menschen*. 28te Aufl. New York, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 43-66.
- Eimer M, Forster B. 2003. Modulations of early somatosensory ERP components by transient and sustained attention. *Experimental Brain Research*, 151:24-31.
- Fabra M. 1996. Elektroenzephalographie, Brain-Mapping, Magnet-Enzephalographie. In: Neundörfer B, Schneider E, Dittmann V, Pöldinger W, Hrsg. *Atlas der Nervenheilkunde – Neurologie und Psychiatrie in Bild und Wort*. Karlsruhe: G.Braun Fachverlag, 33.
- Fan J, Posner M. 2004. Human Attentional Networks. *Psychiat Prax*, 31:210-214.
- Forss N, Jousmaki V, Hari R. 1995. Interaction between afferent input from fingers in human somatosensory cortex. *Brain Research*, 685:68–76.
- Fujiwara N , Imai M , Nagamine T, Mima T, Oga T, Takeshita K, Toma K, Shibasaki H. 2002. Second somatosensory area (SII) plays a significant role in selective somatosensory attention. *Cognitive Brain Research*, 14:389–39.
- Garcia-Larrea L, Bastuji H, Mauguière F. 1991. Mapping study of somatosensory evoked-potentials during selective spatial attention. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 80:201–214.
- Gleixner C, Müller M, Wirth S. 2006/7. *Neurologie und Psychiatrie für Studium und Praxis*. Breisach: Medizinische Verlags- und Informationsdienste, 382-384.

Gunstad J, Cohen RA, Paul RH, Gordon E. 2006. Dissociation of the component processes of attention in healthy adults. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 21:645-650.

Hämäläinen H, Hiltunen J, Titievskaja I. 2000. fMRI activations of SI and SII cortices during tactile stimulation depend on attention. *NeuroReport*, 11:1673-1676.

Hamada Y, Okita H, Suzuki R. 2003. Effect of interstimulus interval on attentional modulation of cortical activities in human somatosensory areas. *Clinical Neurophysiology*, 114:548-555.

Handwerker HO. 2005. Allgemeine Sinnesphysiologie. In: Schmidt RF, Lang F, Thews G, Hrsg. *Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie*. 29te Aufl. Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 273-294.

Hochstetter K, Rupp A, Meinck HM, Weckesser D, Bornfleth H, Stippich C, Berg P, Scherg M. 2000. Magnetic source imaging of tactile input shows task-independent attention effects in SII. *NeuroReport*, 11:2461-2465.

Hötting K, Rösler F, Röder B. 2003. Crossmodal and intermodal attention modulate event-related brain potentials to tactile and auditory stimuli. *Experimental Brain Research*, 148:26-37.

Hsiao S, O'Shaughnessy DM, Johnson KO. 1993. Effects of Selective Attention on Spatial Form Processing in Monkey Primary and Secondary Somatosensory Cortex. *Journal of Neurophysiology*, 70:444-447.

Huonker R, Weiss T, Miltner WHR. 2005. Reduction of somatosensory evoked fields in the primary somatosensory cortex in a one-back task. *Experimental Brain Research*, 168: 98-105.

Huppelsberg J, Walter K. 2003. *Physiologie*. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.

Hyvärinen J, Poranen A, Jokinen KO. 1980. Influence of Attentive Behavior on Neuronal Responses to Vibration in Primary Somatosensory Cortex of the Monkey. *J Neurophysiol*, 43:870-882.

Iguchi Y, Hoshi Y, Tanosaki M, Taira M, Hashimoto I. 2002. Selective attention regulates spatial and intensity information processing in the human primary somatosensory cortex. *NeuroReport*, 13(17):2335-2339.

Iguchi Y, Hoshi Y, Tanosaki M, Taira M, Hashimoto I. 2005. Attention induces reciprocal activity in the human somatosensory cortex enhancing relevant- and suppressing irrelevant inputs from fingers. *Clinical Neurophysiology*, 116:1077-1087.

Jacobs AM. 2006. Messung der Hirnaktivität. In: Funke J, Frensch PA, Hrsg. *Handbuch der Allgemeinen Psychologie – Kognition*. Göttingen: Hogrefe Verlag, 697-704.

James W. 1890. *The principles of psychology*. New York: Holt and Macmillan

Johansen-Berg H, Christensen V, Woolrich M, Matthews PM. 2000. Attention to touch modulates activity in both primary and secondary somatosensory areas. *NeuroReport*, 11:1237-1241.

Josiassen RC, Shagass C, Roemer RA, Ercegovic DV, Straumanis JJ. 1982. Somatosensory evoked potential changes with a selective attention task [Abstract]. *Psychophysiology*, 19:146–159.

Karlowsky C. 1999. *Modulation früher Komponenten somatosensibel evozierter Felder des primären somatosensorischen Kortex durch selektive Aufmerksamkeit [Diplomarbeit]*. Jena: Friedrich-Schiller-Universität, Institut für Psychologie.

Klinke R. 2005. Bauelemente des Nervensystems. In: Klinke R, Pape H-C, Silbernagl S, Hrsg. *Physiologie*. Fünfte komplett überarbeitete Aufl. Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag, 625.

LaBerge D. 1997. Attention, Awareness, and the Triangular Circuit. *Consciousness and Cognition*, 6:149-181.

LaBerge D, Buchsbaum MS. 1990. Positron Emission Tomographic Measurement of Pulvinar Activity During an Attention Task. *The Journal of Neuroscience*, 10(2):613-619.

- Lam K, Kakigi R, Mukai T, Yamasaki H. 2001. Attention and visual interference stimulation affect somatosensory processing: A magnetoencephalographic study. *Neuroscience*, 104:689-703.
- Lavie N. 1995. Perceptual load as a necessary condition for selective attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21:451 – 468.
- Mauguière F, Merlet I, Forss N, Vanni S, Jousmäki V, Adeleine P, Hari R. 1997a. Activation of a distributed somatosensory cortical network in human brain: A dipole modelling study of magnetic fields evoked by median nerve stimulation. Part I: Location and activation timing of SEF sources. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 104:281-289.
- Mauguière F, Merlet I, Forss N, Vanni S, Jousmaki V, Adeleine P, Hari R. 1997b. Activation of a distributed somatosensory cortical network in the human brain: A dipole modelling study of magnetic fields evoked by median nerve stimulation. Part II: effects of stimulus rate, attention and stimulus detection. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 104:290–295.
- Mertens M, Lütkenhöner B. 2000. Efficient neuromagnetic determination of landmarks in the somatosensory cortex. *Clinical Neurophysiology*, 111:1478-1487.
- Mesulam M-M. 1981. A cortical network for directed attention and unilateral neglect. [Abstract]. *Annals of Neurology*, 10(4):309-325.
- Mesulam M-M. 1998. From sensation to cognition. *Brain*, 121:1013-1052.
- Meßlinger K. 2005. Somatoviszzerale Sensibilität. In: Klinke R, Pape H-C, Silbernagl S, Hrsg. *Physiologie*. Fünfte komplett überarbeitete Aufl. Stuttgart/New York: Georg Thieme Verlag, 642.
- Meyer E, Ferguson SS, Zatorre RJ, Alivisatos B, Marrett S, Evans AC, Hakim AM. 1991. Attention modulates somatosensory cerebral blood flow response to vibrotactile stimulation as measured by positron emission tomography [Abstract]. *Ann Neurol*, 29(4):440-443.

Mima T, Nagamine T, Nakamura K, Shibasaki H. 1998. Attention modulates both primary and second somatosensory cortical activities in humans: a magnetoencephalographic study. *J Neurophysiol*, 80:2215–2221.

Moosbrugger H. 1994. Lineare Modelle - Regressions- und Varianzanalysen. Erste Aufl. Bern: Hans Huber Verlag.

Müller HJ, Krummenacher J. 2006. Aufmerksamkeit. In: Funke J, Frensch PA, Hrsg. *Handbuch der Allgemeinen Psychologie – Kognition*. Göttingen: Hogrefe Verlag, 118-126.

Nelson AJ, Staines WR, Graham SJ, McIlroy WE. 2004. Activation in SI and SII; the influence of vibrotactile amplitude during passive and task-relevant stimulation. *Cognitive Brain Research*, 19:174–184.

Nuwer MR, Aminoff M, Desmedt J, Eisen AA, Goodin D, Matsuoka S, Mauguière F, Shibasaki H, Sutherling W, Vibert JF. 1994. IFCN recommended standards for short latency somatosensory evoked potentials. Report of an IFCN committee. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 91:6-11.

Pizzella V, Romani GL. 1990. Principles of Magnetoencephalography. In: Susumo Sato, Hrsg. *Advances in Neurology*. New York: Raven Press, 54:1-9.

Posner MI, Petersen SE. 1990. The attention system of the human brain. *Annu Rev Neurosci*, 13:25-42.

Posner MI, Raichle ME. 1996. *Bilder des Geistes - Hirnforscher auf den Spuren des Denkens*. Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag GmbH.

Posner MI, Rothbart MK. 2007. Research on Attention Networks as a Model for the Integration of Psychological Science. *The Annual Review of Psychology*, 58:6.

Posner MI, Walker JA, Friedrich FJ, Rafal RD. 1984. Effects of parietal lobe injury on covert orienting. *Journal of Neuroscience*, 4(7):1863-1874.

Rose DF. 1990. Magnetic Evoked Responses Comparison with Electrical Evoked Responses. In: Susumo Sato, Hrsg. *Advances in Neurology*, New York: Raven Press, 54:89-94.

Rose DF, Ducla-Soares E. 1990. Comparison of Electroencephalography and Magnetoencephalography. In: Susumo Sato, Hrsg. *Advances in Neurology*, New York: Raven Press, 54:33-37.

Rossini PM, Deutschl G, Pizella V, Tecchio F, Pasquarelli A, Feifel E, Romani GL, Lückling CH. 1996. Topography and sources of electromagnetic cerebral responses to electrical and air-puff stimulation of the hand. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 100:229-239.

Sterr A, Müller MM, Elbert T, Rockstroh B, Pantev C, Taub E. 1998. Perceptual Correlates of Changes in Cortical Representation of Fingers in Blind Multifinger Braille Readers. *The Journal of Neuroscience*, 18(11):4417-4423.

Sterr A, Shen S, Zaman A, Roberts N, Szameitat A. 2007. Activation of SI is modulated by attention: a random effects fMRI study using mechanical stimuli. *NeuroReport*, 18:607–611.

Stöhr M. 1996. Somatosensible Reizantworten von Rückenmark und Gehirn (SEP). In: Stöhr M, Dichigans J, Buettner UW, Hess ChW, Altenmüller E, Hrsg. *Evozierte Potentiale*. Dritte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 23-288.

Sturm W. 2004. Kognitive Kontrolle der Aufmerksamkeitsintensität: Funktionelle Neuroanatomie. *Zeitschrift für Psychologie*, 212(2):107-114.

Sturm W. 2006. Aufmerksamkeitsstörungen. In Hartje W, Poeck K, Hrsg. *Klinische Neuropsychologie*. Sechste Aufl. Stuttgart, New York: Georg-Thieme Verlag, 372-392.

Thomann SE (2004): Einfluss der Stimulation benachbarter und nicht benachbarter Finger auf frühe Komponenten des somatosensorischen Magnetfeldes in einem Intermodalitätsaufmerksamkeitsparadigma [Diplomarbeit]. Jena: Friedrich-Schiller-Universität, Institut für Psychologie.

Treisman AM. 1960. Verbal cues, language and meaning in selective attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12:242-248.

Treisman AM. 1964. Monitoring and storage of irrelevant messages and selective attention. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour*, 3:449-459.

Trepel M. 1999. *Neuroanatomie*. Zweite Aufl. München: Urban und Fischer Verlag.

Van Zomeren AH, Brouwer WH. 1994. *Clinical neuropsychology of attention*. Oxford University Press.

Zimmermann M. 2005. Das somatoviszzerale sensorische System. In: Schmidt RF, Lang F, Thews G, Hrsg. *Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie*. 29te Aufl. Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 295-316.

8 Anhang

8.1 Einverständniserklärung



Friedrich-Schiller-Universität Jena

Universitätsklinikum Jena · Klinik für Neurologie · Erlanger Allee 101 · 07747 Jena

Universitätsklinikum

Klinik für Neurologie

Erlanger Allee 101
D-07747 Jena

Dr. Ralph Huonker
Biomagnetisches Zentrum

Telefon: 0 36 41 - 9 - 32 57 74
Telefax: 0 36 41 - 9 - 32 57 72

E-Mail: rhuonker@biomag.uni-jena.de

Unser Zeichen: huo
Jena, den

Einverständniserklärung

Name des Teilnehmers:

Hiermit bestätige ich als Teilnehmer der Studie „Modulation früher Komponenten des SEF in einer One-back-Task“ über das Ziel der Studie informiert worden zu sein. Ich wurde darüber aufgeklärt, dass die Studie grundlagenwissenschaftlichen Charakter hat. Mir ist bekannt, dass ich den Versuch zu jedem Zeitpunkt von meiner Seite aus beenden kann. Der Versuchsleiter steht mir jederzeit für Rückfragen zur Verfügung.

Über die Magnetresonanztomografie bin ich von einem Arzt aufgeklärt worden / werde ich gesondert von einem Arzt vor der Untersuchung aufgeklärt.

Ich kann diese Einverständniserklärung jederzeit ohne Angabe von Gründen zurückziehen, ohne dass mir daraus ein Nachteil entsteht.

Im Falle eines Zufallsbefundes im MRT möchte ich darüber informiert werden: ☐ ja ☐ nein

Ich stelle mich der Untersuchung freiwillig zur Verfügung.

Die Erhebung und Speicherung meiner Daten entspricht den geltenden gesetzlichen Bestimmungen. Ich erkläre, dass ich mit der im Rahmen der Studie erfolgenden Aufzeichnung von Studiendaten und ihrer anonymisierten Weitergabe, soweit es für die Auswertung der Studie erforderlich ist, und, soweit es sich um personenbezogene Daten handelt, mit deren Einsichtnahme durch zur Verschwiegenheit verpflichtete Mitarbeiter des Klinikums einverstanden bin.

Ort, Datum:

.....
Unterschrift d. Arztes/Wissenschaftlers

.....
Unterschrift des Probanden

8.2 Dokument für Probandenangaben

Studie:	Modulation früher Komponenten des SEF in einer One-back-Task		
verantwortlich:	Dr. R. Huonker, Dr. Th. Weiß, C. Kliemann		
Name, Vorname			
Geburtstag			
Händigkeit	<input type="checkbox"/> rechts	<input type="checkbox"/> links	
Sind in Ihrem Körper Metallteile (z.B. Metallprothese, Gefäßclips, Granatsplitter)?	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	
Für Frauen im gebärfähigen Alter: Könnten Sie schwanger sein?	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	
Tragen Sie eine Brille oder Kontaktlinsen?	<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> Brille	<input type="checkbox"/> Kontaktlinsen
Körpergröße, -gewicht	cm,	kg	
Heimatanschrift Ort			
Straße			
Telefon			
in Jena: (Ort)			
Straße			
Telefon			
tagsüber erreichbar:	(Telefon)		
evtl. e-mail			

8.3 Protokoll

27
26
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

Name _____
Vorname _____
Geburtstag _____
Händigkeit *rechts / links* _____

Exam. No. _____ Datum/Uhrzeit: _____
Kommentar: _____
heute aufgestanden: _____
Schlafdauer [Stunden]: _____
Tag anstrengend?: (1..10) _____

gültige Files:

Tracker vor Messung _____ .tak
letzte Probe *p* _____ .dat
Lok. vor Medianus {l,m} _____ .res
Medianus rechte Hand *p* _____ .dat
Lok. nach Medianus {l,m} _____ .res

Taktil (/ Finger ☐ 1a/1b: ☐ 1a/5: ☐ / LED ☐)

Lok. vor Taktil *A* {l,m} _____ .res
Taktil *p* _____ .dat
Lok. nach Taktil {l,m} _____ .res
Kommentar _____
 T_{avg} : ____ F^- : ____ F^+ : ____ T_{tot} : ____ %: ____ SG: ____ GF: ____

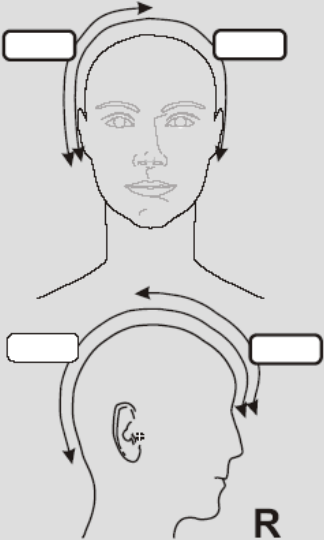
Taktil (/ Finger ☐ 1a/1b: ☐ 1a/5: ☐ / LED ☐)

Lok. vor Taktil *B* {l,m} _____ .res
Taktil *p* _____ .dat
Lok. nach Taktil {l,m} _____ .res
Kommentar _____
 T_{avg} : ____ F^- : ____ F^+ : ____ T_{tot} : ____ %: ____ SG: ____ GF: ____

Taktil (/ Finger ☐ 1a/1b: ☐ 1a/5: ☐ / LED ☐)

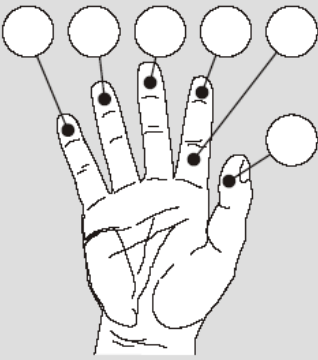
Lok. vor Taktil *C* {l,m} _____ .res
Taktil *p* _____ .dat
Lok. nach Taktil {l,m} _____ .res
Kommentar _____
 T_{avg} : ____ F^- : ____ F^+ : ____ T_{tot} : ____ %: ____ SG: ____ GF: ____

Tracker nach Messungen _____ .tak



Farbe / Finger:

(1) Blau _____
(2) Gelb _____
(3) Grün _____
(4) Rot _____



MRI _____ .iso
└─ test.pom
└─ test.res
└─ .pom

tak

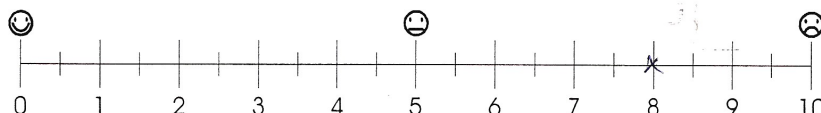
8.4 Skalen zur Einschätzung des Schwierigkeitsgrades und der Richtigkeit

Einschätzung der Schwierigkeit der Aufgabe

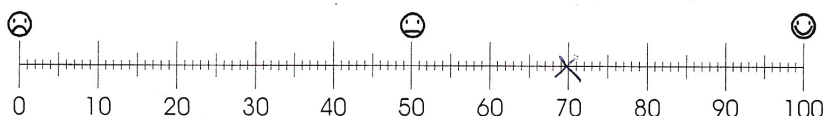
Bitte schätzen Sie für alle drei von Ihnen ausgeführte Aufgaben den Schwierigkeitsgrad und den Anteil der Aufgabe, den Sie richtig gelöst haben, ein:

1. Aufgabe:

Bitte schätzen Sie zunächst den Schwierigkeitsgrad der ersten Aufgabe ein, indem Sie an die entsprechende Stelle in der Skala eine Markierung schreiben. Null bedeutet „ganz leicht / trivial“ und 10 bedeutet „extrem schwierig / unlösbar“.



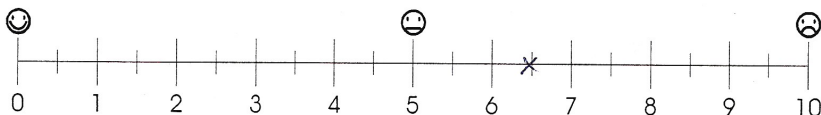
Bitte schätzen Sie jetzt die Häufigkeit Ihrer richtigen Antworten ein, indem Sie an die entsprechende Stelle in der Skala eine Markierung schreiben. Null bedeutet, Sie konnten keine Entscheidung richtig treffen und 100% bedeutet, Sie konnten alle Entscheidungen richtig treffen und haben keine Fehler gemacht.



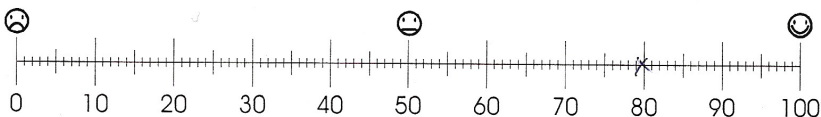
Bitte nehmen Sie jetzt die gleichen Einschätzungen für die zweite Aufgabe vor:

2. Aufgabe

Bitte schätzen Sie zunächst wieder den Schwierigkeitsgrad der zweiten Aufgabe ein:



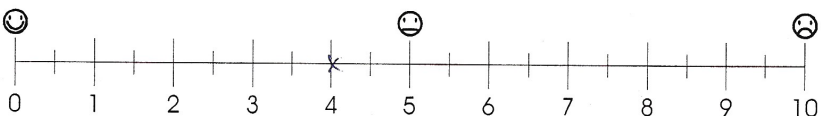
Schätzen Sie nun bitte noch die Häufigkeit Ihrer richtigen Antworten für die zweite Aufgabe ein:



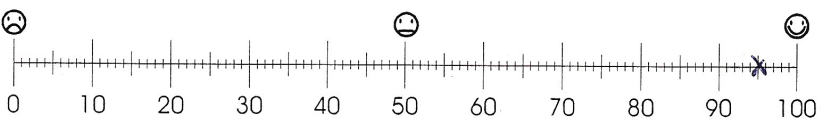
Bitte nehmen Sie jetzt die gleichen Einschätzungen für die dritte Aufgabe vor:

3. Aufgabe

Bitte schätzen Sie zunächst wieder den Schwierigkeitsgrad der dritten Aufgabe ein:



Schätzen Sie nun bitte noch die Häufigkeit Ihrer richtigen Antworten für die dritten Aufgabe ein:



Proband: _

Datum: _

8.5 Datentabellen

Werte für die Stimulation der Zeigefingerspitze mit Angaben Proband, Gruppenzugehörigkeit, dem Messtag, der Bedingung, zum Zeitpunkt der maximalen Feldstärke, Höhe der Feldstärke, Zeitpunkt der ausgewerteten Dipolstärke, Abweichung in %, x-, y-, z-Koordinaten des lokalisierten Dipols und der Wert der Dipolstärke.

Proband/Gruppe	Tag	Bedingung	t von MGFP	MGFP	t von q	dev	x	y	z	Dipolstärke q
berj Gr. 2	1	A	52	724,705	52	8,39	42,83	26,75	62,83	52,240
		B	52	705,316	52	6,94	53,43	22,63	69,53	26,943
		C	54	891,616	54	6,90	50,66	26,61	74,71	31,444
	2	A	52	773,667	52	9,53	55,42	32,49	67,44	32,863
		B	52	732,332	50	4,72	56,49	35,80	68,03	29,051
		C	52	790,116	52	13,11	50,76	36,82	63,60	40,423
bora Gr. 1	1	A	52	556,877	53	6,58	41,97	-8,65	52,13	33,890
		B	48	525,872	48	5,40	46,31	0,30	53,76	27,205
		C	54	463,564	62	13,05	36,81	-7,89	43,36	34,799
	2	A	59	522,176	59	6,73	44,55	-11,36	54,85	33,814
		B	55	472,926	50	7,32	48,00	-6,25	58,10	22,396
		C	59	636,647	61	4,51	46,02	-13,72	57,24	29,537
foij Gr. 1	1	A	48	340,248	48	18,92	45,14	33,79	71,38	13,637
		B	50	416,067	50	10,03	47,46	27,21	67,21	18,575
		C	46	459,984	45	10,70	47,58	23,83	70,51	19,511
	2	A	50	338,867	48	27,21	47,21	50,89	61,44	14,724
		B	52	416,000	52	16,00	51,38	38,42	74,35	13,854
		C	48	421,721	48	17,48	50,15	37,04	69,70	16,662
hrab Gr. 1	1	A	61	711,481	61	9,67	39,95	13,30	63,72	29,761
		B	61	458,217	59	9,75	35,02	13,32	64,48	24,469
		C	58	376,604	58	8,32	40,87	18,41	63,04	18,788
	2	A	59	436,896	59	6,71	39,76	15,89	50,29	23,535
		B	57	502,874	55	9,74	38,10	20,35	53,60	25,576
		C	57	822,030	56	7,51	40,93	17,82	55,04	35,283
ille Gr. 2	1	A	55	232,459	55	9,48	45,01	19,53	56,81	10,312
		B	55	286,957	55	15,01	45,99	19,89	52,07	13,568
		C	57	411,165	59	12,50	45,48	19,98	54,91	15,809
	2	A	55	397,272	55	6,18	50,48	22,39	65,10	15,117
		B	57	219,412	58	13,36	47,25	14,96	54,40	11,652
		C	56	435,116	56	14,65	48,64	20,84	62,06	19,122
klic Gr. 1	1	A	49	493,653	48	6,53	30,57	29,19	77,93	30,402
		B	52	517,536	52	5,33	35,61	32,44	84,06	21,173
		C	51	467,152	50	14,18	33,54	30,62	77,48	25,634
	2	A	51	418,269	51	9,67	33,61	30,59	74,66	29,815
		B	50	422,481	51	6,07	36,86	32,55	82,93	20,558
		C	51	494,627	51	10,23	33,24	28,29	83,99	27,702
oefa Gr. 2	1	A	65	593,660	64	6,71	44,08	-0,27	59,85	25,143
		B	67	600,920	60	8,12	45,11	1,35	54,76	23,847
		C	55	617,046	56	6,90	43,18	-1,82	60,52	24,258
	2	A	53	594,473	54	7,95	46,81	-2,94	60,85	25,523
		B	68	534,019	63	11,24	45,63	1,61	63,13	26,345
		C	57	453,233	57	9,62	45,13	0,58	63,55	23,103
Proband/Gruppe	Tag	Bedingung	t von MGFP	MGFP	t von q	dev	x	y	z	Dipolstärke q
schc Gr. 2	1	A	46	277,554	40	7,88	28,74	-8,85	61,97	20,838

		B	46	326,390	46	6,13	33,39	-6,20	60,00	21,532
		C	47	486,250	47	5,36	31,69	-9,91	63,83	24,632
	2	A	52	456,814	48	8,64	33,80	-10,59	64,48	20,505
		B	48	444,000	47	7,63	35,77	-10,16	62,39	21,076
		C	47	431,148	47	7,95	36,01	-9,03	63,86	21,256
schh Gr. 2	1	A	56	171,666	55	8,22	38,42	2,29	67,61	9,840
		B	57	179,254	58	12,35	34,38	-3,97	77,85	7,488
		C	54	326,517	54	5,33	38,61	-1,06	71,67	14,462
	2	A	47	234,027	51	13,04	37,70	0,19	73,15	8,603
		B	52	270,589	51	22,33	41,34	2,24	78,16	7,788
		C	53	310,251	52	17,88	39,77	0,92	75,12	10,625
webf Gr. 1	1	A	46	399,226	45	5,76	43,34	-9,79	75,83	21,426
		B	48	409,266	48	7,01	49,48	-9,26	77,38	18,183
		C	42	469,699	42	11,84	42,04	-4,61	73,90	32,213
	2	A	40	396,018	40	10,91	46,13	-9,65	79,00	17,087
		B	41	393,026	41	7,38	43,74	-5,19	80,79	17,043
		C	40	479,023	40	14,31	45,20	-7,29	79,80	19,933

Werte für die Stimulation des Zeigefingergrundes mit Angaben Proband, Gruppenzugehörigkeit, dem Messtag, der Bedingung, zum Zeitpunkt der maximalen Feldstärke, Höhe der Feldstärke, Zeitpunkt der ausgewerteten Dipolstärke, Abweichung in %, x-, y-, z-Koordinaten des lokalisierten Dipols und der Wert der Dipolstärke.

Proband/Gruppe	Tag	Bedingung	t von MGFP	MGFP	t von q	dev	x	y	z	Dipolstärke q
berj Gr. 2	1	A	51	526,469	53	5,89	43,83	31,28	66,73	30,177
		B	52	540,061	52	8,65	49,82	22,45	69,15	23,650
	2	A	52	577,040	52	10,19	50,90	32,33	70,13	25,607
		B	51	560,133	51	4,88	56,45	37,20	74,12	18,283
bora Gr. 1	1	A	54	744,969	54	5,32	43,99	-3,03	55,51	39,765
		B	51	614,049	52	7,49	46,69	7,56	52,72	32,641
	2	A	55	478,741	55	5,58	46,14	-9,26	56,86	28,445
		B	55	554,503	55	8,86	48,70	-0,03	56,65	28,419
foij Gr. 1	1	A	42	297,342	42	18,60	46,38	25,37	73,13	11,297
		B	42	327,487	41	14,18	45,14	21,15	71,08	14,253
	2	A	42	207,720	45	17,78	45,17	42,42	64,45	9,818
		B	49	220,617	47	21,58	53,55	32,89	76,60	6,472
hrab Gr. 1	1	A	57	589,701	57	8,22	39,99	15,07	64,81	24,002
		B	57	410,658	57	10,68	34,64	11,41	63,32	23,049
	2	A	47	426,553	54	6,34	40,88	21,66	51,55	18,785
		B	53	578,684	53	9,14	38,84	20,22	53,90	28,933
ille Gr. 2	1	A	54	359,865	55	13,46	44,11	21,70	53,02	18,607
		B	54	442,421	53	10,37	48,30	21,68	50,15	20,767
	2	A	57	442,036	55	7,12	48,79	16,52	64,55	17,697
		B	54	422,320	55	15,00	51,78	23,61	61,64	16,668
klic Gr. 1	1	A	51	363,874	51	5,87	35,67	30,96	77,99	18,132
		B	51	447,021	51	6,42	34,77	32,68	79,03	21,577
	2	A	51	362,395	51	10,72	36,03	30,44	78,06	21,419
		B	48	345,676	48	7,47	34,72	28,44	85,78	17,523
oefa Gr. 2	1	A	57	559,568	58	10,07	43,72	-1,92	63,49	21,503
		B	55	480,872	51	9,57	39,34	-7,16	58,11	23,323
	2	A	52	662,493	51	7,35	44,23	-3,87	61,32	30,939
		B	54	491,863	56	7,85	43,12	-2,53	62,44	27,383
schc Gr. 2	1	A	45	424,574	45	6,34	32,95	-11,13	66,32	25,449
		B	46	569,394	47	5,22	35,59	-8,82	63,64	30,008
	2	A	47	639,010	47	5,98	33,04	-7,16	62,63	33,414
		B	46	559,859	46	4,51	31,76	-8,56	63,59	30,284
schh Gr. 2	1	A	52	248,028	53	6,13	31,58	-5,10	72,02	14,545
		B	54	285,172	54	6,42	33,92	-1,75	71,48	15,296
	2	A	51	289,671	51	21,30	36,18	-6,47	77,39	9,749
		B	52	282,593	50	10,75	39,61	2,62	77,66	8,784
webf Gr. 1	1	A	39	400,999	39	13,72	45,04	-5,36	79,54	18,220
		B	42	420,865	43	6,66	47,37	-4,79	79,66	18,712
	2	A	40	371,517	40	10,30	45,04	-10,11	77,33	17,537
		B	41	438,794	41	5,67	42,24	-5,59	79,35	20,932

8.6 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Christiane Kliemann
Anschrift:	Badstr. 31 09669 Frankenberg
Geburtsdatum/-ort:	30.11.1984, Frankenberg
Staatsangehörigkeit:	deutsch
Familienstand:	ledig
Kinder:	keine

Schulbildung

08/91 - 07/95	Grundschule Frankenberg
08/95 - 06/03	Martin-Luther-Gymnasium, Frankenberg
	Abschluss: Notendurchschnitt 1,3

Weiterführende Ausbildung

Seit 1.10.03	Studium der Medizin an der Friedrich-Schiller-Universität in Jena
12.09.05	Abschluss des ersten Abschnitts der Ärztlichen Prüfung: Note gut (2,0)

Praktische Tätigkeiten

Juli/Aug. 2007	Famulatur in der gynäkologischen Abteilung des Hospital de Base in São José do Rio Preto/Brasilien
Feb/März 2007	Famulatur in der internistischen Gemeinschaftspraxis von Fr. Dr. Hahnfeld (Hämatologie, Onkologie, ambulante Chemotherapie) und Hr. Dr. Krombholz (Gastroenterologie und Hepatologie) in Jena
Aug./Sep 2006	Famulatur in der Pädiatrie des Century-Hospitals in Mulakuzha/Indien
März/April 2006	Famulatur in der Hand-, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie der Universitätsklinik Jena
2003-2005	mehrere Praktika im Krankenhaus Frankenberg in den Stationen Chirurgie und Innere Medizin

Jena, den 15. Mai 2008

Christiane Kliemann

8.7 Danksagung

Mein Dank gilt allen, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ich möchte mich vielmals bei Herrn Prof. Dr. Witte für die Betreuung der Dissertation bedanken.

Ich danke ganz herzlich Herrn Prof. Dr. Weiß für die Hilfen bei der statistischen Auswertung der Arbeit sowie die konstruktive Kritik und Hinweise, die zur Fertigstellung der Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Huonker, der mir Hilfestellungen für die Durchführung der Experimente gab, mich motivierte und mir bei vielen Fragestellungen rasch weiterhalf. Außerdem möchte ich mich vielmals bei allen Mitarbeitern des Biomagnetischen Zentrums bedanken, die mir ebenfalls bei technischen Fragestellungen weitergeholfen haben.

Ich danke Frau Dipl.-Math. Brandstädt für die Hinweise bei der statistischen Auswertung der Daten.

Bedanken möchte ich mich auch bei OA Dr. Mentzel für die Erstellung von MRT-Bildern der Probandinnen.

Ein besonderer Dank gilt allen Probandinnen für die Teilnahme an der Studie und ihre Geduld.

Außerdem möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden, die mich während der gesamten Zeitdauer dieser Dissertation moralisch unterstützten und motivierten, herzlich bedanken.

8.8 Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben: Hr. Prof. Dr. O.W. Witte, Hr. Prof. Dr. T. Weiß, Hr. Dr. R. Huonker, Hr. OA Dr. H.-J. Mentzel und Fr. Dipl.-Math. A. Brandstädt,

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und das Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Jena, den 15. Mai 2008

Christiane Kliemann